

## ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL ELÉCTRICO

Título del proyecto:

“CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR Y UN  
REGULADOR DE CARGA.”

Alumno: Martin Garcia Etxeberria

Tutor: D. Jesús López Taberna

Pamplona: Septiembre 2012

## Índice de contenido

1º CAPÍTULO – INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 - Introducción:.....	6
1.2 - Objeto:.....	6
1.3 - Antecedentes.....	6
1.3.1 - La energía eólica en el mundo y en España.....	8
1.4 - La energía Mini-Eólica.....	11
1.5 - Energía eólica.....	15
1.5.1 - Efectos de los vientos.....	16
1.5.2 - Caracterización del viento.....	16
1.5.3 - Elección de la tecnología.....	18
1.5.4 - El rendimiento de los aerogeneradores .....	19
1.6 - Consumo doméstico:.....	19
2º CAPÍTULO - AEROGENERADOR.....	22
2.1 - Introducción.....	23
2.2 - Tipología de los Aerogeneradores:.....	23
2.2.1 - Posición del aerogenerador:.....	23
2.2.1.1 - Eje Vertical:.....	23
2.2.1.2 - Eje horizontal:.....	26
2.2.1.3 - Ventajas y desventajas.....	27
2.2.2 - Posición del equipo con respecto al viento:.....	27
2.2.2.1 - A barlovento:.....	27
2.2.2.2 - A sotavento:.....	28
2.2.3 - Por el número de palas:.....	28
2.2.3.1 - Una pala.....	28
2.2.3.2 - Dos palas.....	29
2.2.3.3 - Tres palas.....	29
2.2.3.4 - Multipalas.....	29
2.2.4 - Por la manera de adecuar la orientación del equipo a la dirección del viento en cada momento:.....	30
2.3 - Control de potencia:.....	30
2.4 - Perfiles aerodinámicos.....	31
2.4.1 - Terminología básica:.....	31
2.4.2 - Nomenclatura de perfiles NACA.....	32
2.4.3 - Fuerzas sobre un perfil aerodinámico.....	32
2.4.4 - Coeficiente de potencia.....	33
2.5 Diseño de las palas.....	34
2.6 – Construcción de las palas.....	36
2.6.1 – Materiales.....	36
2.6.2 – Madera.....	36
2.6.2 – Fibra de Vidrio.....	38
2.6.2.1 – Tipos de fibras.....	38
2.6.2.2 – Resinas.....	39
2.6.2.3 – Aplicación de la fibra.....	39
2.6.3 – Unión de las palas al rotor.....	43
2.6.4 – Equilibrado de las aspas.....	46
2.6.4.1 – Equilibrado sobre un punto.....	47



2.6.4.2 – Equilibrado preciso.....	48
2.7 – Góndola.....	49
2.8 – Mecanismos de orientación.....	49
2.8.1 - Veleta.....	50
2.8.2 - Rotores auxiliares.....	51
2.8.3 - Servomotor controlado electrónicamente.....	51
2.8.4 - Rotor a sotavento.....	52
2.8.5 - Sistema de orientación adoptado.....	52
2.9 Sistemas de regulación de la velocidad de giro.....	53
2.9.1 – Regulación por frenos aerodinámicos.....	54
2.9.2 – Regulación por palas orientables.....	54
2.9.3 – Regulación por orientación del rotor.....	55
2.9.4 – Frenado aerodinámico por palas huecas.....	56
2.9.5 – Cortocircuito del generador.....	56
2.9.6 – Sistema de regulación adoptado.....	56
2.10 – Bajada de la corriente.....	57
2.11 – Torres.....	58
2.11.1 – Torres de celosia.....	59
2.11.2 – Torre tubular de acero.....	60
2.11.3 – Torre tubular de hormigón.....	61
2.11.4 – Torres de pequeña altura.....	62
3º CAPÍTULO - GENERADOR.....	64
3.1 – Introducción.....	65
3.2 – Tipos de máquinas eléctricas.....	65
3.2.1.- Máquina de corriente continua.....	65
3.2.1.1 - Principio de funcionamiento.....	66
3.2.1.2 - La Maquina de corriente continua como generador.....	67
3.2.1.3 - Ventajas y desventajas del generador de la maquina de corriente continua.....	68
3.2.2 - Maquina asíncrona.....	68
3.2.2.1 – principio de funcionamiento.....	73
3.2.2.2 - Motor asíncrono como generador.....	75
3.2.2.3 - Ventajas y desventajas del generador de la maquina asíncrona.....	77
3.2.3- Máquina Síncrona.....	78
3.2.3.1 – Principio de funcionamiento.....	78
3.2.3.2 - Ventajas y desventajas de la maquina síncrona como generador.....	89
3.3 - Elección del motor.....	89
3.3.1 – características técnicas del motor ge150-240-225.....	92
3.3.2 – Ensayos de vacío y cortocircuito.....	95
3.3.2.1 - Inconvenientes del motor como generador.....	96
3.3.3 – Solución adoptada para disminuir la tensión.....	96
4º CAPÍTULO – CONVERTIDOR REGULADOR DE CARGA.....	101
4.1 - Estructura del convertidor.....	102
4.1 - Introducción.....	102
4.2 – Componentes del convertidor.....	104
4.2.1 - EL IGBT.....	104
4.2.2 - EL DIODO.....	111
4.2.3 - La Inductancia.....	114
4.3 Convertidor Reductor dc-dc (Buck).....	115

4.3.1 - Estructura y funcionamiento del convertidor reductor.....	115
4.3.2 – Funcionamiento en modo continuo.....	116
4.3.3 – Funcionamiento en modo discontinuo.....	118
4.4 - Convertidor electrónico construido.....	120
4.4.1 – Componentes utilizados en el convertidor.....	121
4.4.1.1 - Rectificador trifásico.....	121
4.4.1.2 - Bus de continua del convertidor reductor.....	125
4.4.1.3 - Bloque de conmutación.....	126
4.4.1.4 - Condensador de desacoplo.....	128
4.4.1.5 - Inductancia.....	129
4.4.1.5 - Condensadores de la salida del convertidor.....	131
4.4.2- Control del convertidor electrónico.....	132
4.4.2.1 - Lazo de Corriente.....	132
4.4.2.2 - Medida de la tensión y la corriente.....	133
4.4.2.3 - Regulador PI.....	137
4.4.2.4 - Modulación por anchura de pulso.....	139
4.4.2.5 - MPPT Maximum power point tracking.....	140
4.4.2.6 – Obtención de la señal modulante.....	144
4.5 – Driver.....	146
4.5.1 – Estructura del driver.....	147
4.5.2 – Funcionamiento del driver.....	148
4.5.3 – Configuraciones del driver.....	150
4.5.3.1 – Modo directo.....	151
4.5A.3.2 – Modo de medio puente.....	151
4.5.4 - Configuración de los pines del driver.....	152
4.5.4.1 – Pines de entrada.....	152
4.5.4.2 – Pines de salida.....	154
4.5.5 - Circuito del driver.....	155
4.5.5.1 – Pines de entrada.....	155
4.5.5.2 - Pines de salida.....	157
4.6 – Protecciones.....	158
4.6.1 – Medidas de protección.....	158
4.6.1.1 – Refrigeración.....	158
4.6.1.2 – Parada del aerogenerador.....	159
4.6.2 – Protección contra embalamiento.....	160
4.6.3 – Protección de temperatura.....	161
4.6.3.1 – Inductancia.....	161
4.6.3.2 – Semiconductores.....	162
4.6.4 – Protección contra sobrecarga de las baterías.....	165
4.6.5 – Protección contra cortocircuito.....	166
4.6.6 – Panel indicador de estado.....	166
4.7 – Simulación del sistema.....	168
4.8 – Implementación de los circuitos electrónicos.....	168
5º CAPÍTULO - BATERÍAS.....	171
5.1 Introducción.....	172
5.2 Tipos de baterías.....	172
5.2.1 – Baterías de plomo-ácido .....	172
5.2.2 – Pila alcalina .....	173

5.2.3 – Baterías de níquel-hierro(NI-FE) .....	173
5.2.4 – Baterías alcalinas de manganeso .....	173
5.2.5 – Baterías de níquel-cadmio(NI-CD) .....	173
5.2.6 - Baterías de níquel-hidruro metálico (NI-MH).....	173
5.2.7 - Baterías de iones de litio (LI-ION).....	174
5.2.8 - Baterías de polímero de litio (LIPO).....	174
5.3 - Características de la batería de Plomo-Ácido:.....	174
5.3.1 - Ciclo de carga.....	175
5.3.2 - Ciclo de descarga.....	175
5.3.3 - Reacciones en el interior de la batería.....	178
5.3.4 - Precauciones que se deben de tomar con las baterías.....	179
5.4 Elección de batería.....	180
5.5 - Instalación de las baterías.....	181
6º CAPÍTULO – INSTALACIÓN ELÉCTRICA.....	183
6.1 – Introducción.....	184
6.2 – Bajada de la torre.....	184
6.3 – Línea subterránea.....	184
6.4 – Línea interior.....	185
6.5 – cálculo de secciones.....	185
6.5.1 – Criterio térmico.....	185
6.5.2 – Criterio de caída de tensión.....	185
6.5.3 – Criterio de cortocircuito.....	186
6.6 – Cable empleado.....	187
7º CAPÍTULO - ANEXOS.....	188
7.1 - Conclusiones:.....	189
7.3 – Presupuesto:.....	190
7.4 – Bibliografía:.....	191
7.5 – Planos.....	193

# **1º CAPÍTULO – INTRODUCCIÓN**

## **1.1 - Introducción:**

El objetivo de este proyecto es el aprovechamiento de la energía eólica en zonas rurales, las cuales tienen recursos suficientes para autoabastecerse energéticamente. En Navarra existen multitud de caseríos que se encuentran alejados de las poblaciones y muchos de ellos se encuentran con multitud de cortes de suministro debidos a diferentes problemas en la red eléctrica. Estos fallos en la red dificultan la vida en estas zonas rurales, donde la mayoría de la población vive del primer sector, como puede ser la ganadería y un corte de luz puede suponer una parada total es su actividad y puede generar grandes pérdidas si el corte se alarga.

Estos problemas que suceden en las zonas rurales se pueden solucionar con otro tipo de fuentes de energías eléctricas como la solar, la microhidráulica y la minieólica. Con solo una de estas seria suficiente, pero la combinación de las tres es la mejor manera de garantizar el suministro eléctrico autónomo.

En el presente proyecto se define la construcción de un aerogenerador para una casa que se sitúa en una zona rural. La casa se encuentra conectada a una red monofásica a 300mts del centro de transformación, con una pérdida de potencia considerable a plena carga, ya que la sección de cable que tiene la línea es muy fina.

El aerogenerador será de gran ayuda para evitar la caídas de tensión, para reducir el gasto del consumo de energía eléctrica y la solución a los cortes de suministro que se suele ocasionar en invierno.

## **1.2 - Objeto:**

El presente proyecto tiene como objeto la construcción de un aerogenerador para abastecer parte del consumo de energía eléctrica de una casa que se encuentra conectada a red. Con la intención de disminuir la factura de energía eléctrica y evitar los cortes de energía en la propia vivienda.

La dimensión del aerogenerador está adecuada para satisfacer el consumo de toda la vivienda. La potencia nominal es de 4kW, de esta forma la vivienda será autosuficiente, y podrá aislarse de la red siempre y cuando el aerogenerador suministre la energía demandada y las baterías tengan una capacidad suficiente para cubrir la demanda en días de poco viento. La vivienda no se desconectará de la red, así si el molino se avería o si hay varios días de poco viento, la vivienda podrá alimentarse desde la red.

## **1.3 - Antecedentes**

La palabra eólico viene del griego EOLO, Dios del viento en la mitología griega. Hoy en día todos entendemos la energía eólica como la energía producida por el viento, energía cinética generada por el efecto de las masas de aire que se desplazan desde áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

El viento es una manifestación indirecta de la energía solar, producida como resultado del

diferente grado de calentamiento de la superficie terrestre por los rayos solares y por el movimiento de rotación de la Tierra sobre sí misma. Considerando que la aportación energética de la radiación solar con la atmósfera de la Tierra es de 174.000 TW, sólo 1.74 TW están destinados a mantener la circulación general de la atmósfera, es decir, los vientos. Esta cantidad supone unas 507.100 veces la energía obtenida por biomasa en todas las plantas de la Tierra.

En la utilización de la energía eólica interviene de forma decisiva, además de la velocidad media del viento, las variaciones diurnas, nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura, la entidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves, y valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Es también importante conocer la velocidad máxima del viento. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima de 12 Km/h, y que no supere los 65 Km/h.

Algunos de los motivos que hacen que este tipo de energía esté alcanzando tanta importancia en los últimos años son que la energía eólica no contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles, contribuyendo a evitar el cambio climático. Además es una de las fuentes más baratas, que a día de hoy puede competir en rentabilidad con otras fuentes energéticas tradicionales como las centrales térmicas de carbón e incluso con la energía nuclear, si se consideran los costes de reparar los daños medioambientales.

El generar energía sin que exista un proceso de combustión o una etapa de transformación térmica supone, desde un punto de vista medioambiental, un procedimiento muy favorable, por ser limpio y estar exento de problemas de contaminación. Es más, se suprime radicalmente el impacto originado que supone la extracción de los combustibles, su transporte, combustión y procesado de los residuos, lo que es sin duda muy beneficioso para el medio ambiente. Además, evita la contaminación que conlleva el transporte de los combustibles: gas, petróleo, gasoil, carbón. Reduce el intenso tráfico marítimo y terrestre cerca de las centrales. Suprime riesgos de accidentes durante ese transporte y un sinnúmero de aspectos más. La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad presenta nula incidencia sobre las características físico-químicas del suelo o su erosionabilidad, ya que no se produce ningún contaminante que incida sobre este medio, ni tampoco vertidos o grandes movimientos de tierra. Al contrario de lo que ocurre con las energías convencionales, la energía eólica no produce ningún tipo de alteración sobre los acuíferos, ni gases tóxicos, ni contribuye al efecto invernadero, ni destruye la capa de ozono, tampoco crea lluvia ácida. No origina, tampoco, productos secundarios peligrosos ni residuos contaminantes.

Otras ventajas a destacar de la energía eólica es que puede ser instalada en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo en zonas desérticas, en zonas no aptas para ser cultivables, etc. Aunque también puede convivir con otros usos del suelo, por ejemplo prados para uso ganadero o cultivos bajos como trigo, maíz, patata, etc.

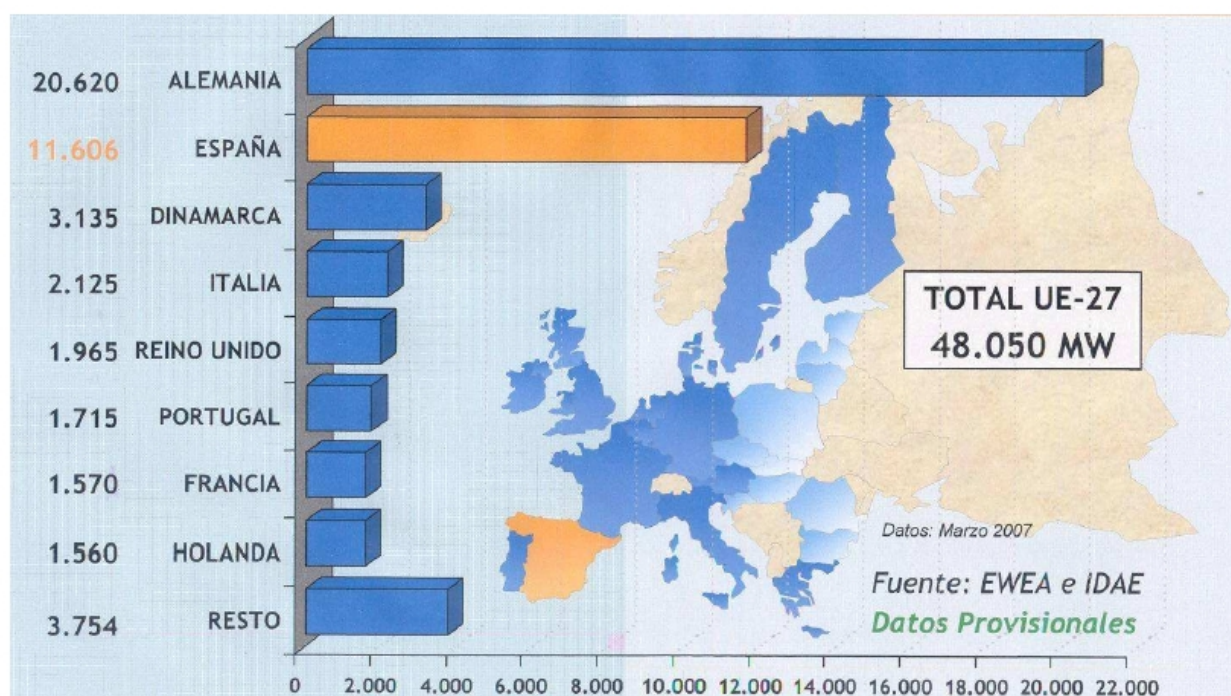
Su utilización combinada con otros tipos de energía, habitualmente la solar, permite la autoabastecimiento energético de viviendas, terminando así con la necesidad de conectarse a redes de suministro, pudiendo lograrse autonomías de varios días, sin alimentación desde ninguno de los dos sistemas.

Los únicos tipos de inconvenientes que implica el uso de la energía eólica son el impacto visual, el ruido producido por el giro del rotor y la muerte de algunos pájaros que chocan contra las aspas. Pero, obviamente, estos inconvenientes son mínimos en comparación con cualquier otra forma de energía. Por lo tanto, la energía eólica representa claramente un avance y una estrategia viable en el futuro de la generación energética.

### 1.3.1 - La energía eólica en el mundo y en España

En los últimos 25 años, la energía eólica ha alcanzado un nivel de desarrollo muy alto. En estos más de 25 años, los generadores eólicos han crecido de los 55 KW en 1982 a los 5 MW de hoy en día, los diámetros de los rotores han pasado de los 15 a los 126 metros y la potencia total instalada es ahora de 75,000 MW comparada con los 100 MW en 1980. En Europa el “share” de potencia producida se ha incrementado desde un 0,001% a más del 3% y los fabricantes europeos continúan dominando el creciente mercado global en tecnología eólica. De hecho, la energía eólica es una de los mayores éxitos industriales europeos en los últimos 25 años. El 30% de toda la potencia instalada en la UE en los últimos 5 años pertenece a instalaciones eólicas. Los planes auguran que en 2020 se alcanzarán un 20% de energías renovables. Cabe esperar, por tanto, que la energía eólica participe activamente en la transformación del actual sistema energético en uno que nos asegure un futuro sostenible, basado en energía no contaminante, inagotable gracias al desarrollo de energías renovables.

En la figura siguiente se puede observar cual era la situación de potencia eólica total instalada en Europa en el año 2007. Cabe destacar la situación de España en este mapa, siendo el segundo país, sólo por detrás de Alemania, en potencia instalada y seguida por Dinamarca, Italia y Reino Unido a una distancia considerable.



Producción de energía eólica en Europa en marzo de 2007





*Parques eólicos actuales*

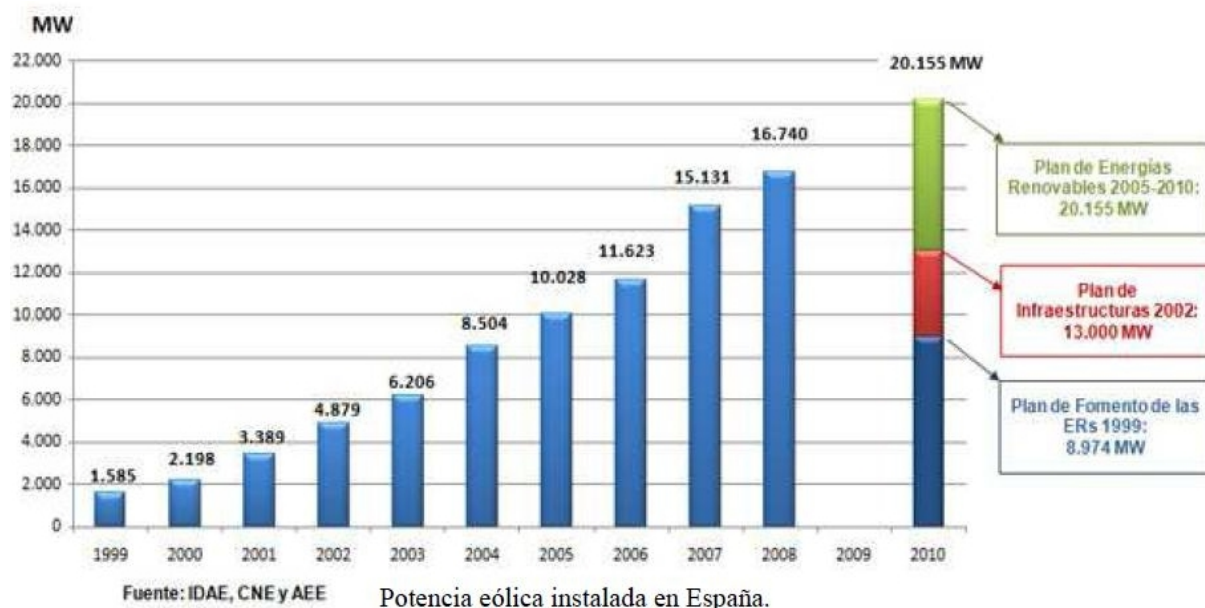
La energía eólica en España es una de las fuentes de energía más importantes del país. Producía a mediados de 2007 el 20 % de la energía eólica mundial. Actualmente España es el segundo productor de energía eólica en Europa, después de Alemania, y con unos niveles de producción muy similares a los de los Estados Unidos. Por comunidades autónomas, Galicia lidera el ranking de distribución de potencia eólica instalada, seguida de Castilla La Mancha. A escala europea, como ya se vio anteriormente, Alemania con 20,622 MW continúa liderando el ranking, seguida de España con 12,800MW.

Como ejemplo de la importancia que tiene la energía eólica en España cabe destacar el del parque eólico de Tarifa (Cádiz), gestionado por la Sociedad Eólica de Andalucía (SEA), alcanzó en mayo de 2008 el primer teravatio/hora (1.000 millones de kilovatios hora) de energía facturada, convirtiéndose en el primero de España en conseguir esta cifra. Con toda esta energía suministrada se puede abastecer el consumo doméstico de una ciudad de unos 700.000 habitantes, durante un año y medio.

Otros datos que resaltan el nivel de desarrollo de esta tecnología en nuestro país son:

- La media anual estaba en el 10% de la producción total en el año 2007.
- España producía a mediados de 2007, el 20 % de la energía eólica mundial
- Las siete centrales nucleares que hay en España, con sus 8 reactores, juntas generan 7.742,32 MW. Que son 5.058 MW menos que la potencia eólica instalada en España
- Los datos de la patronal eólica AEE sostienen que la energía eólica finalizará el 2009 como 'la tercera tecnología en potencia instalada' por delante del carbón.

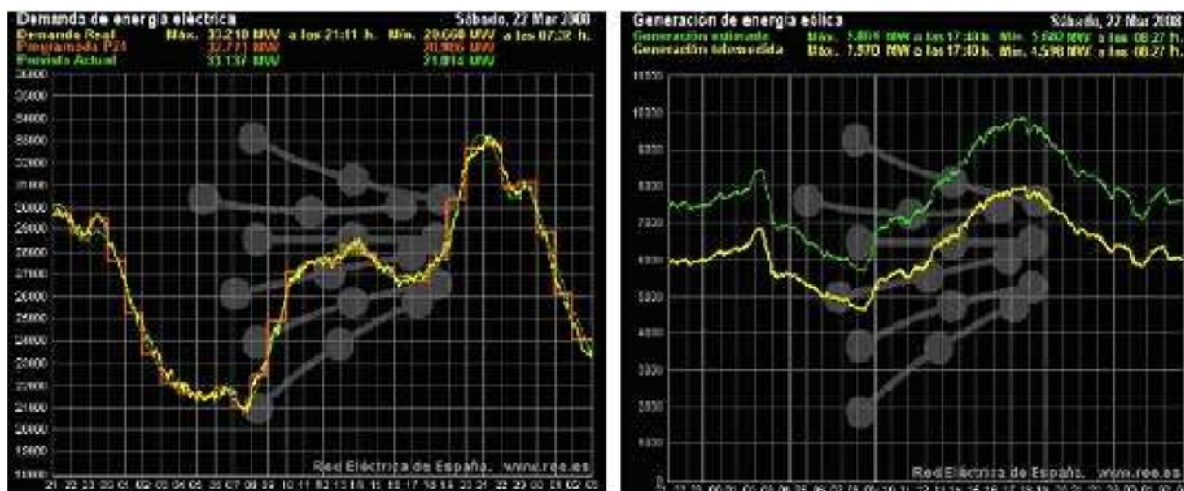




*Distribución de la energía eólica instalada en España*

Otro dato histórico que cabe destacar es que en Marzo de 2008 la energía eólica llegó a alcanzar un 40% de cobertura de la demanda eléctrica en España. Fue el 22 de Marzo, en torno a las 18 h cuando se alcanzó este nuevo récord en el que se alcanzó el 40,8% con 9.662 MW en funcionamiento. El temporal de viento que se registró en la península a lo largo de la Semana Santa propició, al coincidir con días festivos de menor consumo, que la producción eólica alcanzase durante ese periodo unos índices máximos de cobertura de la demanda de electricidad peninsular que, además de la punta del 40,8%, la mayor parte del día el porcentaje cubierto por la energía eólica osciló entre el 20 % y el 35 %. En el período transcurrido desde el viernes 21 de Marzo de 2008 al domingo 23, la cobertura promedio de esta misma demanda había sido del 28%, lo cual supone un hito en la diversificación del abastecimiento eléctrico de nuestro país y desde luego un escenario difícil de encontrar en otros países, excluidos los casos de Dinamarca y Portugal.

Como es visible, es muy destacable la importancia de la energía eólica ha alcanzado tal nivel que en días particularmente ventosos, llega a aportar más de una cuarta parte de la energía total consumida en el país, por ejemplo, el 20 de Marzo de 2007, un año antes de alcanzarse este valor histórico.



*Comportamiento de la demanda y generación eólica el sábado 22 de marzo del 2008.*

Aquel día los molinos de viento aportaron un 25,5% de la generación eléctrica total en España, por encima del resto de las fuentes:

- Las plantas nucleares el 20,7% de la producción total.
- Las térmicas de carbón, el 15,5%.
- Los saltos hidráulicos, el 15,32%.
- Las plantas de ciclo combinado el 11,8%.

Según un estudio realizado por EWEA (Asociación Europea de Energía Eólica) y Greenpeace, España tiene un potencial eólico técnicamente aprovechable de 43.000MW, lo que supone un margen suficiente para satisfacer en 2020 como mínimo un 20% de su demanda eléctrica prevista. Con estos datos, el futuro de la Eólica en España parece muy favorable.

## 1.4 - La energía Mini-Eólica

La utilización de sistemas capaces de generar energía de forma limpia y sostenible esta teniendo un gran crecimiento en los últimos años, esto se debe a los actuales problemas derivados del cambio climático y del agotamiento de los recursos a los que nos enfrentamos. Tras la firma del protocolo de Kyoto (Japón, 1997) la búsqueda de soluciones energéticas limpias y sostenibles ha aumentado considerablemente.

En Europa, en los últimos años se está produciendo el llamado boom de las "Wind Farms" (lugares de producción de energía eólica con turbinas de más de 500 Kw) y este hecho ha contribuido a reducir los costes de tecnología. Aunque debido a sus grandes dimensiones y al fuerte impacto ambiental, principalmente visual, tiene dificultades para la concesión de licencias. Sin embargo, aquí es donde aparecen las instalaciones eólicas de pequeño tamaño cuyo impacto visual puede ser muy pequeño y que pueden ser usados en aplicaciones diferentes a las industriales: hogares, infraestructuras turísticas, poblaciones aisladas, etc. Además de todo lo anterior, la dificultad para extender la red eléctrica y el desarrollo del mercado eléctrico liberalizado

están contribuyendo a fomentar la tecnología mini-eólica.

Nos referimos a micro sistemas, con una potencia de unos pocos de kilovatios, que carecen apenas de requisitos para su instalación, en los que se puede producir energía eléctrica de forma sostenible y respetuosa con el medio ambiente. No existe una clasificación convencional que defina lo micro-eólico, pero se suele aludir con este concepto a instalaciones de potencias menores de 100 Kw, y los rendimientos globales de este tipo de instalaciones suelen estar comprendidos entre un 0.30 y 0.60, es decir inferiores a los de dimensiones industriales.

En relación con los aerogeneradores de muy baja potencia, potencias inferiores a 10 Kw, utilizados tradicionalmente para bombeo de agua (aerobombas multipala) y minigeneradores eólicos para producción de energía eléctrica (normalmente formando conjuntos mixtos eólico-fotovoltaicos en viviendas aisladas), hay que señalar que, aunque el número de instalaciones realizadas y potencialmente previsibles en los próximos años es alto, su contribución energética es muy baja. Se estima que hacia el año 2010 puede existir una potencia instalada total de unos 13.000 Kw.

En España hay actualmente dos fabricantes de pequeños aerogeneradores y varios importadores, especialmente de fabricantes de Estados Unidos. Según fuentes de uno de estos fabricantes, el mercado potencial de este tipo de instalaciones en España podría estimarse en torno a los 600-700 aerogeneradores anuales, cifra que se podía aumentar de forma considerable si existiese un mayor apoyo por parte de las administraciones públicas.

El impacto medio ambiental de las instalaciones micro-eólicas tiene elementos en común con el de las grandes instalaciones (gran ocupación de suelo, impacto visual, ruido, interferencias en las telecomunicaciones, efectos negativos sobre la fauna y la vegetación, efectos electromagnéticos...), ya que interfiere con los mismos elementos naturales, aunque tenga resultados perceptivos diferentes.

Por una parte, las micro-turbinas tienen un tamaño mucho más pequeño que el de los grandes aerogeneradores y, por tanto, necesitan menos espacio y son relativamente poco visibles. Sin embargo, a menudo están instaladas cerca de otros elementos y pueden suponer una pérdida de espacio que podría estar destinado a otros fines, un impacto visual (se trata de una presencia invasora con la que convivir, aunque pueden ser agradables desde el punto de vista estético), interferencias en las comunicaciones y efectos electromagnéticos. Aunque no son relevantes, estos inconvenientes tienen que ser tenidos en cuenta en el estudio preliminar de viabilidad del proyecto.

La mayoría de los micro-generadores son de eje horizontal, con rotor a barlovento (el viento encuentra primero las palas y después la torre); además suelen ser de conicidad nula. Existen diferentes configuraciones de turbinas eólicas: monopala, tripala, bipala, multipala. El aumento del número de palas aerodinámicas disminuye la velocidad de rotación y aumenta el rendimiento, pero encarece el precio de las turbinas. Por dicho motivo, el mercado se ha centrado en rotores bipala y tripala, siendo esta última configuración la más habitual, debido a que el generador funciona de manera más uniforme, y por tanto, su duración es mayor; además la energía que produce es ligeramente superior, con el consecuente aumento de rendimiento y además, son visualmente menos agresivos, gracias a que poseen una configuración más simétrica, una velocidad de rotación mas baja, más relajante para los ojos de quien la observa.

Sobre las palas de este tipo de aerogeneradores, destacar que la mayoría son fabricadas con poliéster reforzado con fibra de vidrio o con fibras de carbono, raramente con madera. Antiguamente se utilizaba el aluminio, pero en los últimos años se ha dejado de utilizar por su tendencia a deformarse bajo esfuerzo. Existen varias opciones a la hora de utilizar este tipo de

sistemas:

- Existen zonas aisladas desde un punto de vista energético, en las que no resulta económicamente rentable llevar hasta allí la red eléctrica. En estos casos es posible instalaciones no conectadas a red. Mediante el uso de aerogeneradores de pequeño tamaño junto con sistemas de acumulación (baterías) y sistemas híbridos ( con paneles fotovoltaicos y generadores diésel)
- Otras aplicaciones están relacionadas con la alimentación de sistemas de telecomunicación ( repetidores, antenas de telefonía móvil instalados lejos de la red eléctrica, etc)
- Sistemas de bombeo y drenaje: áreas de cultivo, etc.
- Necesidades de alumbrado público: carreteras, faros, plataformas, semáforos...
- Alimentación de zonas aisladas dentro de espacios naturales protegidos.

Con el actual funcionamiento del mercado eléctrico en España y la liberalización del sector, en la actualidad, se permite que los titulares de instalaciones de mini-eólica o de cualquier otra forma de producción de electricidad a partir de fuentes renovables, puedan utilizar la energía producida por estos sistemas para el autoconsumo, obteniendo un ahorro en la factura de energía eléctrica igual al contravalor de consumo evitado y transferir al sistema, a través de la compañía distribuidora de electricidad, su producción o los excedentes de energía eléctrica, siempre que sea posible su absorción por la red. La venta de esta energía sobrante se realizará al precio del mercado mayorista más los incentivos previstos en base al régimen especial de producción de electricidad, determinado en el Real Decreto 2818/1998 en el que se dictan las normas de producción de energía eléctrica abastecidas por recursos o fuentes de energías renovables. Así mismo, los productores responsables de este tipo tienen derecho a recibir en todo momento de la compañía distribuidora la energía eléctrica que sea necesaria para el desarrollo de su actividad, abonando la tarifa que les corresponda.

Las características de este marco regulatorio son importantes para el desarrollo de la micro-eólica, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La energía eólica es un recurso intermitente, la producción no es constante en el tiempo y no se puede prever. Pueden darse momentos en los que se produzca mucha energía y la necesidad energética sea nula, o puede suceder lo contrario.
- Permite reducir los costes, evitando la instalación de caros sistemas de almacenamiento de energía.
- Además evita al usuario de instalar contadores de energía añadidos.

Por lo que concierne al procedimiento de evaluación de impacto ambiental, las micro-instalaciones eólicas no están sujetas a la legislación básica estatal. Sin embargo, hay que tener en cuenta la normativa de evaluación del impacto ambiental de la Comunidad Autónoma en la que se desee instalar una instalación de estas características.

Como se puede observar este desarrollo de tecnologías que permiten producir energía de origen autóctono en el mismo lugar donde se demanda, sin pérdidas en el transporte, cediendo el exceso a la red y a su vez, aumentando la eficiencia del sistema, parece muy ventajoso. Es más,



### *Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga*

estas tecnologías se pueden desarrollar en todo tipo de espacios: rurales, industriales, urbanos o infraestructuras, sin perjudicar a los espacios naturales. Además, su desarrollo es modular, permitiendo su crecimiento en función de la demanda sin ser necesarias grandes inversiones.

Analizándolo desde un punto de vista tecnológico-económico se podrían destacar los siguientes puntos para definir el estado actual del campo de la mini-eólica:

- No existe madurez en el sector. Dispersión de parámetros, fabricación bastante artesanal, lazos de regulación pasivos, etc.
- Su fiabilidad y eficiencia es mejorable: Falta de mecanismos de certificación, falta de documentación, etc.
- Aplicaciones aisladas y conectadas a red.
- Se exige tecnología muy robusta, ya que requiere bajos costes de operación y mantenimiento y se suele instalar en las cercanías de zonas habitadas.
- Las emisiones de ruido y vibraciones deben estar muy controladas.
- Falta de un mercado adecuado de apoyo.



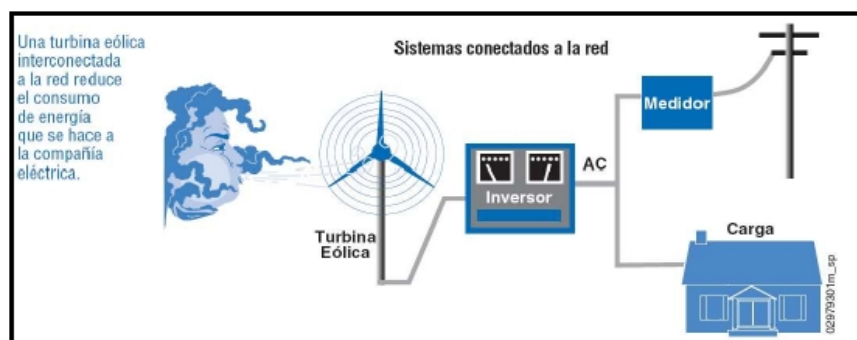
*Ejemplo de una instalación eólica domestica.*

Por otro lado podemos también analizar cuales son las ventajas que hacen de la mini-eólica una tecnología interesante:

### *Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga*

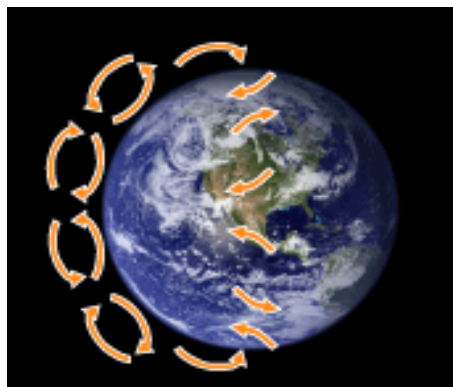
- El consumo típico residencial es de entre 800 y 2000 kWh/mes y un aerogenerador de 1,5 Kw. produce entre 2000 y 3000 kWh de media, con lo que se evitaría la emisión de alrededor de 1,4 t de CO<sub>2</sub>.
- Puede suministrar electricidad en lugares aislados y alejados de red.
- Causa menor impacto visual que las máquinas grandes.
- Genera energía junto a los puntos de consumo, por lo que reduce las pérdidas en el transporte.
- Es accesible a muchos usuarios, sin apenas necesidad de obra civil y su instalación es sencilla.
- Estimula la concienciación a nivel personal del problema energético y del cambio climático.
- Funciona con vientos moderados y no requiere estudios de viabilidad complicados.

Dependiendo del recurso eólico, una turbina eólica puede reducir la facturación eléctrica entre el 50 y el 90% y ayudar a evitar los altos costos de extender las redes de suministro a sitios remotos, prevenir interrupciones de energía y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.



*Esquema básico de una instalación eólica doméstica.*

## **1.5 - Energía eólica**



El viento que sube desde el Ecuador hacia los polos circula por las capas más altas de la atmósfera, alrededor de 30° de latitud norte; la fuerza de Coriolis evita que continúe en dirección a los polos. A esa latitud se encuentra una zona de altas presiones, por lo que el aire comienza a descender de nuevo.

Cuando el viento sube desde el Ecuador origina una zona de bajas presiones cerca del suelo, lo que atrae vientos del Norte y del Sur. En los polos, debido al aire frío, son originadas zonas de altas presiones. La Troposfera es donde ocurren todos los fenómenos meteorológicos, así como el efecto invernadero. Las direcciones dominantes del viento son importantes en la ubicación de los aerogeneradores, no obstante la geografía local también puede influir en las direcciones del viento.

Estos vientos en la realidad son considerados como vientos geostráficos, y ocurren a partir de 1000m de altitud. Las velocidades de estos vientos se miden con globos meteorológicos.

### **1.5.1 - Efectos de los vientos**



*Efecto erosivo del viento en la Gran Esfinge y la Pirámide de Kefrén (Egipto).*

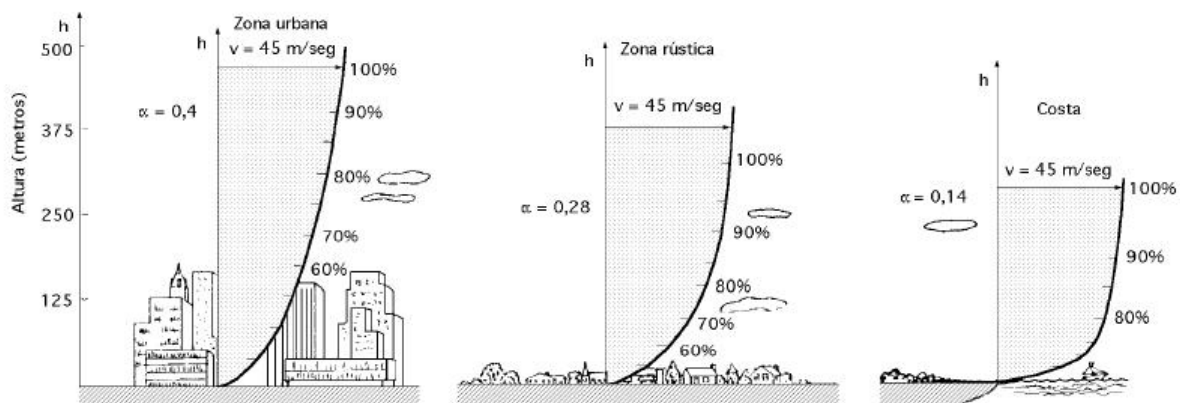
El viento actúa como agente de transporte, en efecto, interviene en la polinización anemófila, en el desplazamiento de las semillas etc. Es también un poderoso agente erosivo, en especial en las zonas de clima seco o desértico, donde los granos de arena arrastrados por el viento pueden llegar a la transformación y hasta la denudación (es decir, la completa remoción) de las formas del relieve. También actúa como agente de sedimentación, ya que cuando el viento pierde velocidad, deposita los materiales que transporta. La arena forma acumulaciones llamadas dunas, que se desplazan en la dirección del viento a medida que los granos van siendo arrastrados desde la cara enfrentada al viento (barlovento) hacia la cara opuesta al viento (sotavento).

### **1.5.2 - Caracterización del viento**

- **Velocidad:** Para realizar la caracterización del régimen de viento en un emplazamiento se debe conocer la velocidad media del viento. Los valores medios se encuentran entre 5 y 7 m/s. Este es uno de los parámetros más importantes para asegurar la viabilidad económica del proyecto. La energía que es capaz de desarrollar una turbina depende de su curva de potencia (relación entre la potencia eléctrica de salida y la velocidad del viento incidente) y

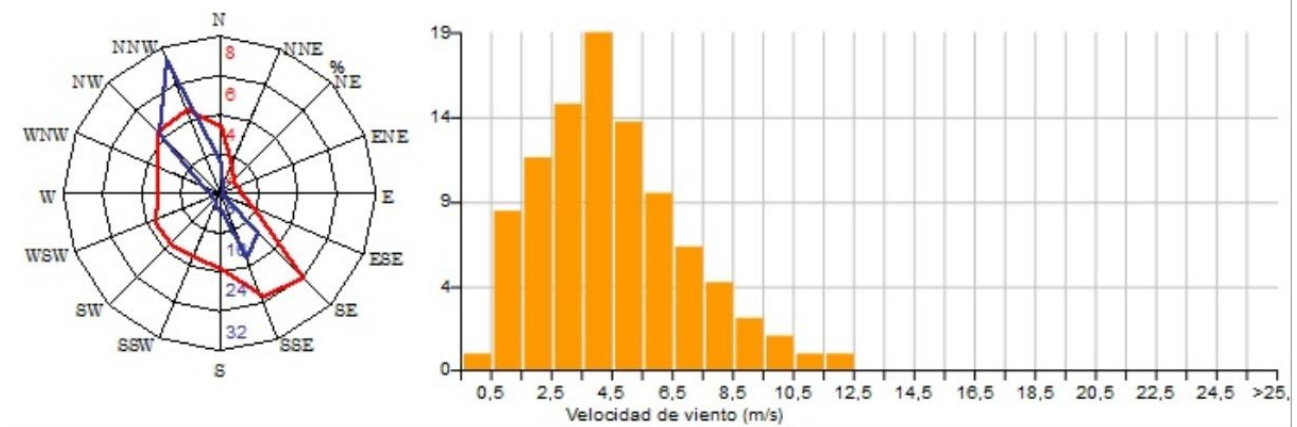
la distribución de frecuencias de la velocidad del viento. La función que relaciona la energía producida por una turbina concreta en un emplazamiento determinado es creciente con la velocidad media anual del emplazamiento. La velocidad máxima de trabajo suele estar en torno a los 15m/s.

- **Turbulencias:** Las turbulencias son vientos irregulares, dependen de las características del emplazamiento. Las variaciones a corto plazo influyen en la determinación de los valores de las cargas de fatiga que puede soportar la turbina. Por esta razón es muy importante determinar con precisión el nivel de turbulencias de cada emplazamiento, ya que la vida útil y la disponibilidad de los aerogeneradores depende en buena medida de este factor.
- **Rafagosidad:** Lo constituyen los valores máximos, rachas o picos de viento que implican variaciones bruscas de esfuerzos dinámicos estructurales.



- **Perfil vertical del emplazamiento:** El rozamiento del aire con la superficie terrestre hace que el viento no sea igual en todas las alturas, sino que es creciente con la altura. Como se puede apreciar en la siguiente imagen, según la cantidad y tamaño de los obstáculos y accidentes del terreno, la velocidad del viento crece más rápido o más lento con la altura.
- **Distribución Weibull:** Es la expresión analítica más usada en estudios de energía eólica para representar la probabilidad de velocidades de viento.





- Distribución direccional del viento. Es la llamada “rosa de vientos” que representa el porcentaje de tiempo en que el viento proviene de una determinada dirección (la dirección del viento está referida siempre al lugar desde donde procede la corriente de aire). Normalmente, también se refleja en la rosa de vientos la distribución de velocidades de viento para cada intervalo direccional. En la siguiente imagen se puede apreciar la roseta de vientos y el histograma de velocidades del emplazamiento que tendrá el aerogenerador de este proyecto.
- Distribución energética por sectores. Relaciona las velocidades del viento con la energía que se genera en dicha dirección.
- Parámetros Clase IEC del emplazamiento: velocidad media anual, velocidad de referencia y turbulencia

### 1.5.3 - Elección de la tecnología

Para la elección de la tecnología a emplear, se debe tener en cuenta:

- **Clase IEC** (características técnicas del aerogenerador). Se determina a partir de los parámetros estadísticos del viento en el emplazamiento: velocidad media, velocidad de referencia, índice de turbulencia. Debe ser ratificado por el fabricante.
- **Perfil vertical** (altura del generador). Condiciona la altura de eje del aerogenerador. Se debe medir el viento a diferentes alturas con el fin de que en todos los puntos del rotor el valor de la velocidad del viento sea parecida.
- **Densidad del emplazamiento** (Curva de potencia a utilizar.). Es de gran importancia por ser un factor directamente proporcional a la producción. Se calcula a partir de la altitud media y aplicando la norma UNE 28-533-85 (ISO2533) de atmósfera normal. También a partir de la presión y temperatura.

### 1.5.4 - El rendimiento de los aerogeneradores

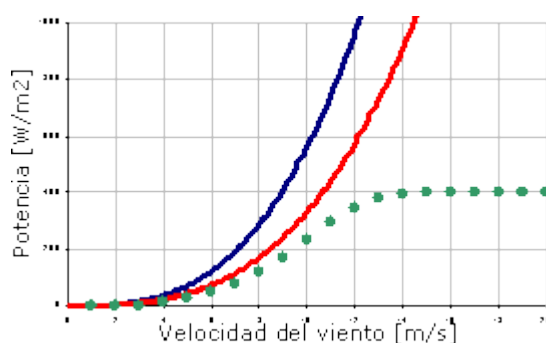
El rendimiento de las máquinas eólicas depende de la **intensidad del viento**: a igualdad de diámetro de las palas, al aumentar la velocidad del viento, la potencia teóricamente extraíble aumenta de manera exponencial.

Por lo tanto, antes de decidir instalar un sistema eólico es indispensable conocer bien las características del viento en el lugar en el que se piensa instalar los aerogeneradores. Estos conocimientos se obtienen realizando previamente un exhaustivo estudio de la frecuencia, de la velocidad, de la duración y de la dirección del viento.

La intensidad del viento depende de las características orográficas del terreno. Una circunstancia fundamental es la rugosidad del mismo: en llanura o en el mar el viento sopla con intensidad mayor que en el campo o en los alrededores de las ciudades. Otro elemento a tener en cuenta es la altitud del terreno: cuanto más se sube mayor es la velocidad del viento, pero menor es su densidad.

Las máquinas eólicas funcionan dentro de parámetros mínimos y máximos de la velocidad del viento. En línea general:

- Pueden ser activados con viento variable de 2 a 4 m/s (**velocidad de cut-in**)
- Cuando el viento alcanza la velocidad de 10–14 m/s (**velocidad de corte o nominal**), se activa un dispositivo de control de la potencia.
- Se paran cuando la velocidad del viento supera los 20-25 m/s (**velocidad de cut-off**).



*Potencial extraíble por metro cuadrado de área cubierta por el rotor.*

### 1.6 - Consumo doméstico:

## Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga

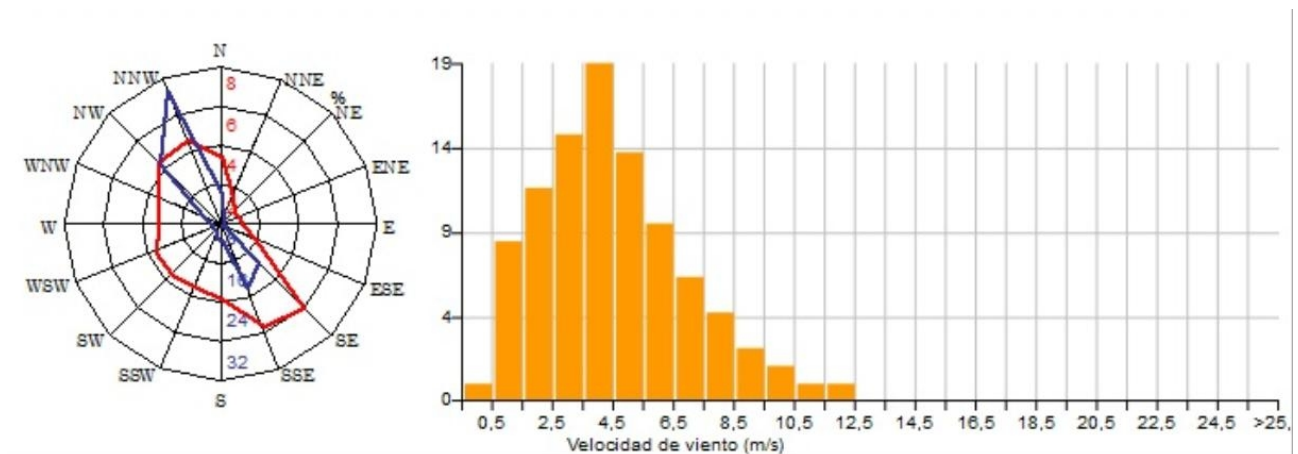
En la próxima imagen se presenta una tabla con el consumo estimado de la vivienda, en la cual se instalará el aerogenerador.

CARGAS DE LA VIVIENDA	Cantidad	Potencia unitaria(W)	Tiempo de utilización diaria (h)	Consumo diario (kW/h)
Horno	1	2500	0,16	0,4
Lavadora	1	1500	1,5	2,25
Bombillas	10	75	0,5	0,375
Enchufes	15	1200	0,08	1,44
Frigorífico	1	300	8	2,4
Energía diaria total				6,865
Consumo mensual (kW/h)				205,95
Costo mensual (1kW/h=0,15€)				30,8925

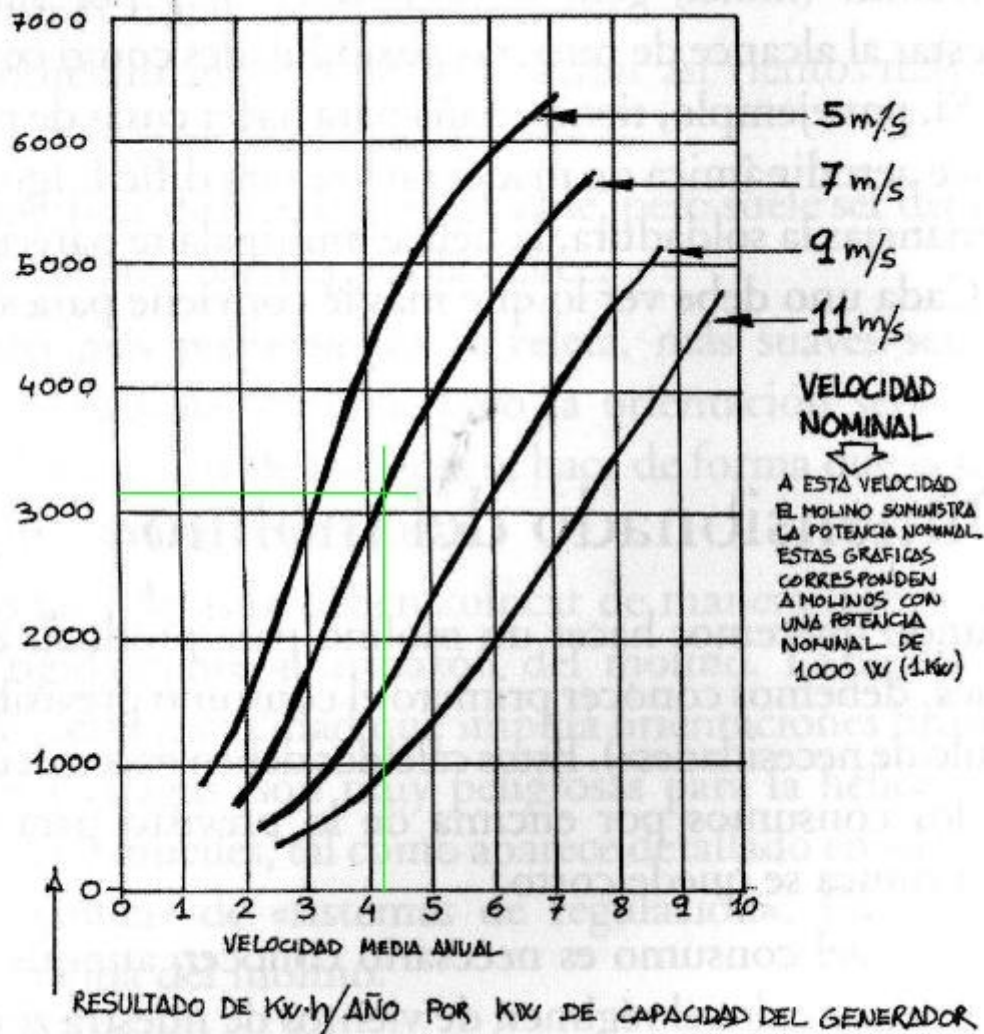
En lo que se refiere a los enchufes, se ha estimado que ahí se incluye Tv, plancha, radio...

El aerogenerador que se ha construido tiene una potencia nominal de 4kW. Como se puede comprobar, esa energía que produce no es constante en todo momento, ya que la energía del viento no es constante. Si fuese así, sería suficiente un aerogenerador de 300W para abastecer energéticamente una vivienda de estas características.

La velocidad media del viento no es conocida en el emplazamiento, pero se han obtenido unos datos aproximados desde la página web del CENER. La velocidad media se ha estimado a partir de los valores del histograma y es aproximadamente de 4,2m/s. El valor de la velocidad no es muy fiable, ya que los datos que da el CENER son una estimación, y a partir de ellos se ha hecho otra estimación para calcular la velocidad media, pero sirven para hacerse una idea de cuanta energía se puede llegar a generar.



En la próxima imagen aparece una gráfica con la cual se puede estimar la producción anual de energía según la velocidad media y la velocidad de viento que necesita el aerogenerador para generar 1000W de potencia. El aerogenerador generará dicha potencia a 6,5m/s, pero si se tienen en cuenta las pérdidas en los cables y en el convertidor de manera aproximada, se puede decir que generará esta potencia a una velocidad de 7m/s.



En la imagen se ha dibujado en verde el valor de la velocidad media y el corte con la curva que corresponde a una velocidad de 7m/s para generar 1000W. El valor estimado de producción anual es de unos 3200kW/h y el valor de la demanda anual es algo menor que 2500kW/h. Esto significa que el aerogenerador, en teoría, generará mas energía de la necesaria, aún así esto no significa que la vivienda vaya a ser autosuficiente energéticamente, ya que es posible que haya temporadas de poco viento donde la potencia generada sea mucho menor que la consumida, y si las baterías no tienen capacidad suficiente, habrá que consumir electricidad de la red. En otros periodos, donde la demanda sea baja y la generación alta, una vez de que se carguen las baterías el aerogenerador dejara de generar, por lo que el valor de la generación anual será algo menor.

## **2º CAPÍTULO - AEROGENERADOR**

## 2.1 - Introducción

Las máquinas eólicas han sido estudiadas por el hombre en forma intensiva y dentro de ellas existen en la actualidad diferentes tipos que van desde pequeñas potencias, a las grandes máquinas americanas y alemanas de varios MW.

Son numerosos los dispositivos que permiten el aprovechamiento de la energía eólica, pudiéndose hacer una clasificación de los mismos según la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento.

En las máquinas eólicas de eje horizontal, para obtener en las palas una velocidad angular regular y uniforme ( $w$ ), para una determinada velocidad del viento ( $v$ ) se requiere que tanto la dirección del viento, como su velocidad, se mantengan constantes con respecto a las palas. Los aerogeneradores de eje horizontal se encuentran más desarrolladas, tanto desde el punto de vista técnico como comercial.

Por el contrario, en las máquinas eólicas de eje vertical, manteniendo las mismas condiciones regulares en la velocidad del viento y en la velocidad angular de las palas, resulta que éstas pueden estar sometidas a un viento aparente de dirección y velocidad continuamente variables, por lo que en estas máquinas, el flujo aerodinámico resulta ser muy complicado, ignorándose en muchas ocasiones las verdaderas posibilidades de las mismas.

Las máquinas eólicas se pueden clasificar en:

- Aerogeneradores de eje horizontal.
- Aerogeneradores de eje vertical.

## 2.2 - Tipología de los Aerogeneradores:

En la actualidad existe toda una enorme variedad de modelos de aerogeneradores, diferentes entre sí tanto por la potencia proporcionada, como por el número de palas o incluso por la manera de producir energía eléctrica (aisladamente o en conexión directa con la red de distribución convencional). Pueden clasificarse, pues, atendiendo a distintos criterios:

### 2.2.1 - Posición del aerogenerador:

#### 2.2.1.1 - Eje Vertical:

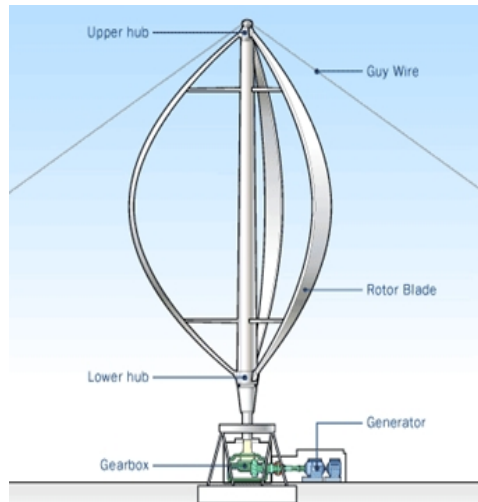
Su característica principal es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo. Son también llamados "VAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "vertical axis wind turbines". Existen tres tipos de estos aerogeneradores:

- **Darrieus:**

Consisten en dos o tres arcos que giran alrededor del eje. Requiere para un correcto funcionamiento, vientos de 4 a 5 metros por segundo como mínimo, manteniendo

## Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga

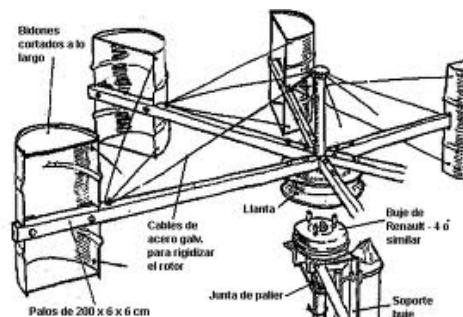
grandes velocidades de giro y un buen rendimiento; se construyen con 2 ó 3 hojas



*Darrieux*

- **Panemonas:**

Destaca por ser sencillo y muy robusto. Se compone de cuatro o más semicírculos unidos a un eje central. Su rendimiento es muy bajo, su coeficiente de rendimiento oscila entre un 6 y un 10% sirve para bombeo e incluso para un pequeño molino de cereales. Su mayor ventaja es su fácil construcción y su robustez.

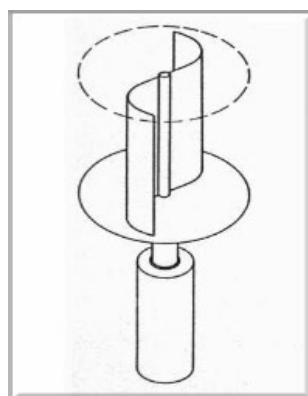


*Panemona*

- **Savonius:**

El aerogenerador Savonius tiene dos o más filas de semicilindros colocados opuestamente. Puede arrancar con poco viento, siendo muy sencilla su fabricación; tiene una velocidad de giro pequeña y su rendimiento es relativamente bajo.





*Darrieux*

- **Giromill:**

El molino vertical de palas tipo giromill, que deriva del Darrieux, tiene entre 2 y 6 palas (Foto superior derecha).



*Giromill*

El modelo Darrieux arranca mal, mientras que el Savonius se puede poner en funcionamiento con una pequeña brisa; debido a ello se puede hacer una combinación sobre un mismo eje de ambas máquinas de forma que un rotor Savonius actúe durante el arranque y un rotor Darrieux sea el que genere la energía para mayores velocidades del viento.





*Darrieux + Savonius*

### 2.2.1.2 - Eje horizontal:

Son los más habituales y en ellos se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años. Se los denomina también “HAWTs”, que corresponde a las siglas de la denominación inglesa “Horizontal axis wind turbines”. Las partes principales de un aerogenerador de eje horizontal son:

- Rotor: Las palas del rotor, construidas principalmente con materiales compuestos, se diseñan para transformar la energía del viento en un momento torsor en el eje del equipo. Los rotores modernos pueden llegar a tener un diámetro superior a 100 metros y producir potencias del orden de los MW. La velocidad de rotación está limitada por la Velocidad de punta de pala, cuyo límite actual se establece por criterios acústicos.
- Caja de engranajes o multiplicadora: No todos los aerogeneradores la tienen, transforman la baja velocidad del rotor en una velocidad superior en el eje del generador eléctrico.
- Generador: Existen de diferentes tipos dependiendo del diseño del aerogenerador. Pueden ser síncronos y asíncronos, jaula de ardilla o doblemente alimentados, con excitación o con imanes permanentes.
- Torre: Sostiene el generador a una altura, donde los vientos son de mayor intensidad y con menos turbulencias.
- Sistema de control: se hace cargo del funcionamiento seguro y eficiente del equipo, controla la orientación de la góndola, la posición de las palas y la potencia total entregada por el equipo

Todos los aerogeneradores de eje horizontal tienen su eje de rotación principal en la parte superior de la torre, que tiene que orientarse hacia el viento de alguna manera. Los aerogeneradores pequeños se orientan mediante una veleta, mientras que los más grandes utilizan un sensor de dirección y se orientan por servomotores. Dado que la velocidad de rotación de las aspas es baja, la mayoría hacen uso de una caja reductora para aumentar la velocidad de rotación del generador eléctrico.

En general, la hélice está emplazada de tal manera que el viento, en su dirección de flujo, la encuentre antes que a la torre (rotor a barlovento). Esto disminuye las cargas adicionales que genera la turbulencia de la torre en el caso en que el rotor se ubique detrás de la misma (rotor a sotavento). Las palas de la hélice se montan a una distancia razonable de la torre y tienen alta rigidez, de tal manera que al rotar y vibrar naturalmente no choquen con la torre en caso de vientos fuertes.

A pesar de la desventaja en el incremento de la turbulencia, se han construido aerogeneradores con hélices localizadas en la parte posterior de la torre, debido a que se orientan en contra del viento de manera natural, sin necesidad de usar un mecanismo de control. Sin embargo, la experiencia ha demostrado la necesidad de un sistema de orientación para la hélice que la ubique delante de la torre. Este tipo de montaje se justifica debido a la gran influencia que tiene la turbulencia en el desgaste de las aspas por fatiga. La mayoría de los aerogeneradores actuales son de este último tipo.

### **2.2.1.3 - Ventajas y desventajas**

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal respecto de los de eje vertical son:

- Mayor rendimiento
- Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos)
- Menor superficie de pala  $S$  a igualdad de área barrida  $A$
- Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa

Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal, son:

- No necesitan sistemas de orientación
- Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo
- No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por cuanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante.

## **2.2.2 - Posición del equipo con respecto al viento:**

### **2.2.2.1 - A barlovento:**

Las máquinas, corriente arriba tienen el rotor de cara al viento. La principal ventaja de los diseños corriente arriba es que se evita el abrigo del viento tras la torre. Con mucho la mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño.

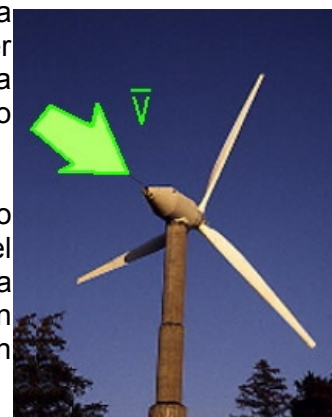
Por otro lado, también hay algo de abrigo enfrente de la torre, es decir, el viento empieza a desviarse de la torre antes de alcanzarla, incluso si la torre es redonda y lisa. Así pues, cada vez que el rotor pasa por la torre, la potencia del aerogenerador cae ligeramente.

El principal inconveniente de los diseños corriente arriba es que el rotor necesita ser bastante inflexible, y estar situado a una cierta distancia de la torre. Además una máquina corriente arriba necesita un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento.

### 2.2.2.2 - A sotavento:

Las máquinas, corriente abajo tienen el rotor situado en la cara a sotavento de la torre. La ventaja que tienen es que pueden ser contruidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente.

Sin embargo, en grandes máquinas ésta es una ventaja algo dudosa, pues se necesitan cables para conducir la corriente fuera del generador. Si la máquina ha estado orientándose de forma pasiva en la misma dirección durante un largo periodo de tiempo y no dispone de un mecanismo de orientación, los cables pueden llegar a sufrir una torsión excesiva.



*Palas a sotavento*

Un aspecto más importante es que el rotor puede hacerse más flexible. Esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica de potencia de la máquina, es decir, las palas se curvarán a altas velocidades del viento, con lo que quitarán parte de la carga a la torre.

El inconveniente principal es la fluctuación de la potencia eólica, debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre. Esto puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño corriente arriba.

## 2.2.3 - Por el número de palas:

### 2.2.3.1 - Una pala

Al tener sólo una pala estos aerogeneradores precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrar. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida de la instalación. Una aplicación de este tipo de máquinas puede verse en la foto situada al lado.



*Aerogeneradores monopala*

### **2.2.3.2 - Dos palas**

Los diseños bipala de aerogeneradores tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida y necesitan un viento mayor para poder arrancar. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual.

### **2.2.3.3 - Tres palas**

La mayoría de los aerogeneradores modernos tienen este diseño, con el rotor mantenido en la posición corriente arriba, usando motores eléctricos en sus mecanismos de orientación. Este diseño tiende a imponerse como estándar al resto de los conceptos evaluados. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño.

### **2.2.3.4 - Multipalas**

Con un número superior de palas o multipalas, tiene una velocidad más baja, pero un par superior que los casos anteriores. Se trata del llamado modelo americano, debido a que una de sus primeras aplicaciones fue la extracción de agua en pozos de las grandes llanuras de aquel continente. Dentro de las multipalas también destacan los molinos tradicionales y los cretenses, que se utilizaban para moler o bombear agua.



*Molino tradicional, parque eólico  
Guerinda*



*Molino cretense*

## 2.2.4 - Por la manera de adecuar la orientación del equipo a la dirección del viento en cada momento:

El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento. Se dice que la turbina tiene un error de orientación si el rotor no está perpendicular al viento. Un error de orientación implica que una menor proporción de la energía del viento pasará a través del área del rotor (esta proporción disminuirá con el coseno del error de orientación) Por tanto, la eficiencia del mecanismo de orientación es fundamental para mantener el rendimiento de la instalación. Los diferentes tipos pueden ser:

- Mediante conicidad: son aquellos que usan el motor de orientación para posicionar la góndola en cada momento, dependiendo de la dirección a la que sople el viento.
- Mediante veleta: usan una especie de aleta en la parte anterior de la góndola, el viento choca transversalmente con este elemento, y mueve todo el conjunto. Este método solo es apto en pequeños equipos de poco peso.
- Mediante molinos auxiliares: básicamente se trata de construir varios molinos en distintas caras de la góndola, de esta manera se consigue que gire uno u otro dependiendo de la dirección del viento. Es un sistema muy poco usado.

## 2.3 - Control de potencia:

En general, los aerogeneradores modernos de eje horizontal se diseñan para trabajar con velocidades del viento que varían entre 3 y 24 m/s de promedio. La primera es la llamada velocidad de conexión y la segunda la velocidad de corte. Básicamente, el aerogenerador comienza produciendo energía eléctrica cuando la velocidad del viento supera la velocidad de conexión y, a medida que la velocidad del viento aumenta, la potencia generada es mayor, siguiendo la llamada curva de potencia. Asimismo, es necesario un sistema de control de las

velocidades de rotación para que, en caso de vientos excesivamente fuertes, que podrían poner en peligro la instalación, haga girar a las palas de la hélice de tal forma que éstas presenten la mínima oposición al viento, con lo que la hélice se detendría.

Para aerogeneradores de gran potencia, algunos tipos de sistemas pasivos, utilizan características aerodinámicas de las palas que hacen que aún en condiciones de vientos muy fuertes el rotor se detenga. Esto se debe a que él mismo entra en un régimen llamado "pérdida aerodinámica". También se utilizan sistemas de protección activa, que cuando el viento es muy fuerte giran las palas, de manera que el viento le hace menos fuerza.

Para aerogeneradores de pequeña potencia, se suelen utilizar sistemas pasivos que o bien giran las palas como en el caso anterior, pero por acción de la fuerza centrífuga, o desorientan el rotor, ya sea mediante veleta auxiliar, eje descentrado o inclinación de la góndola, disminuyendo la superficie de viento que atraviesa el rotor y disminuyendo así la potencia.

## **2.4 - Perfiles aerodinámicos**

Los perfiles aerodinámicos se utilizan para la construcción de palas aerodinámicas, estas palas tienen mayor rendimiento, por lo que, para obtener una misma potencia el diámetro del rotor es inferior. Los perfiles mas usados son NACA 4415 y CLARK-Y. Habrá de tener cuidado con que las tres palas estén en el mismo plano perpendicular al eje, y que el rotor sea simétrico.

Este tipo de palas son muy rápidas, por lo que su construcción tiene que ser muy precisa, las palas deben estar equilibradas, sino vibrarán al girar y terminaran por romper el aerogenerador. También hay que protegerlas para que no se embalen, ya que si su velocidad aumenta mucho, la fuerza centrífuga que sufren las palas podría llegar a destruirlas, para que esto no ocurra el valor de la velocidad de giro en rpm multiplicada por el diámetro en metros debe ser menor que 2000.

Otra desventaja importante es el bajo par de arranque que tienen las palas, para aumentarlo se pueden diseñar aspas más anchas, con mas par y menos velocidad, otra solución empleada en bipalas es añadir 2 palas pequeñas que le proporcionen un mayor par de arranque, ya que si el aerogenerador necesita vientos mas rápidos para arrancar desaprovechara mucha energía.

### **2.4.1 - Terminología básica:**

- Borde de Ataque: Punto central de la parte delantera del perfil.
- Borde de Salida: Punto central de la parte trasera del perfil.
- Cuerda: Línea recta que une el borde de ataque con el borde de salida.
- Extrados: Es la parte superior de un perfil, medido desde el borde de ataque hasta el borde de salida.
- Intrados: Es la parte inferior de un perfil, medido desde el borde de ataque hasta el borde de salida.



- Espesor: Es la máxima distancia entre el extrados y el intrados.
- Curvatura Media: Es la curva equidistante entre el extrados y el intrados.

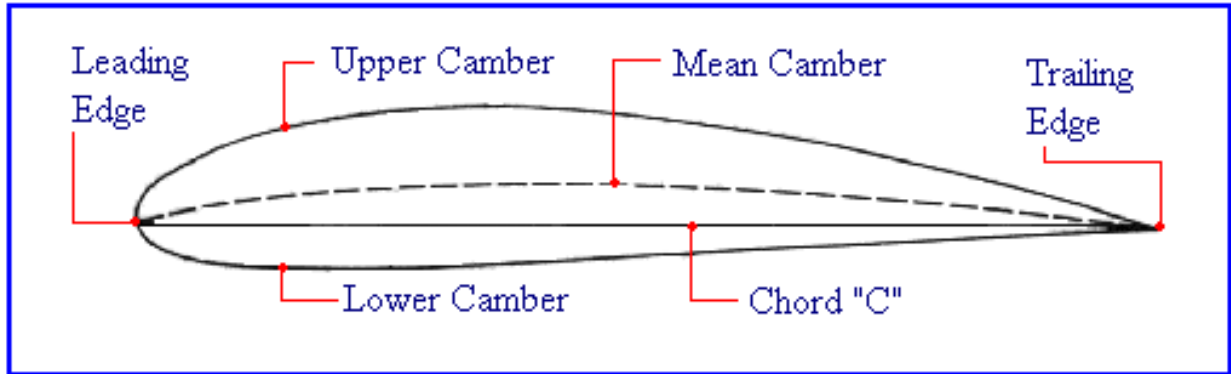
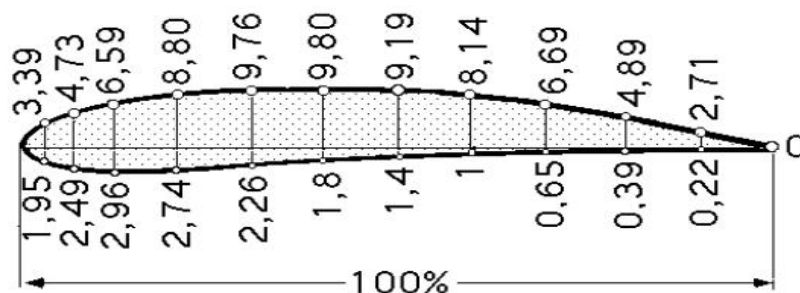


Figure 3-1 Cross section of an airfoil

## 2.4.2 - Nomenclatura de perfiles NACA

Los perfiles NACA vienen determinados por un conjunto de cifras que definen su forma geométrica. Suelen ser de cuatro o cinco cifras, a los que se les pueden añadir dos cifras más. Los más normales son los de cuatro cifras, su significado es el siguiente:

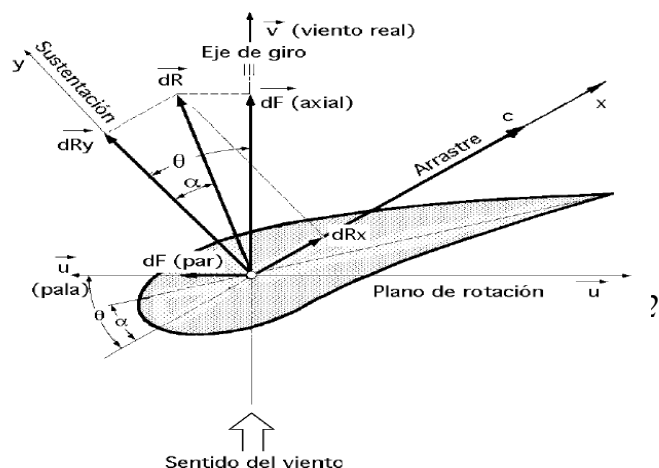
- La primera cifra tiene un significado geométrico, e indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en %, proporcionando la máxima curvatura.
- La segunda cifra tiene un significado geométrico, e indica su posición, es decir, la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media o máxima curvatura
- Las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo en % respecto a la cuerda.



NACA

## 2.4.3 - Fuerzas sobre un perfil aerodinámico

Cuando el aire incide en un perfil



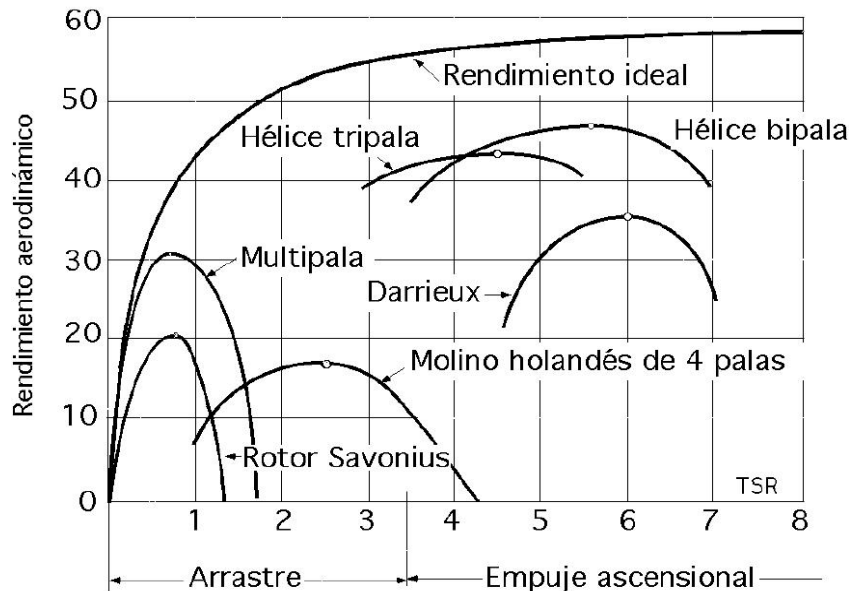
aerodinámico, este experimenta una fuerza aerodinámica que puede descomponerse en dos componentes:

- sustentación ( $C_y$ )
- Arrastre ( $C_r$ )

Estas fuerzas son las que hacen girar el rotor. Los coeficientes de sustentación ( $C_y$ ) y de arrastre ( $C_r$ ) son función del perfil aerodinámico y el ángulo de ataque (El ángulo formado entre la cuerda del perfil y la dirección del viento).

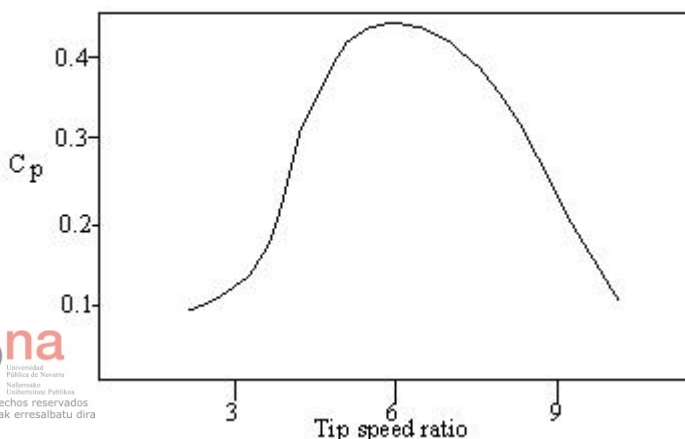
## 2.4.4 - Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia indica el rendimiento que tiene la pala para cada TSR (Tip Speed Ratio). Cada pala está diseñada para trabajar a un TSR específico, para conseguir esto, se mide la velocidad del viento y la velocidad del rotor y se ajusta la potencia para que el rotor gire a la velocidad en la que se obtiene mayor rendimiento.



En la imagen anterior se puede ver el valor del rendimiento aerodinámico (que es función de  $C_p$ ). Los molinos lentos, con un TSR inferior a 3,5 trabajan sobretodo con la fuerza de arrastre, son molinos lentos, con un bajo rendimiento pero con un par alto, por lo que son útiles para bombeo de agua u otros trabajos en los que se necesite un par grande.

Los molinos rápidos trabajan con empuje ascensional (Debido a la sustentación), son máquinas rápidas, con poco par y un rendimiento que suele andar en torno al 45%.



En esta otra imagen, se puede ver el valor del rendimiento para cada TSR en una pala aerodinámica. Aunque esta gráfica no es la de la pala que se construye en este proyecto, es una buena aproximación, ya que el

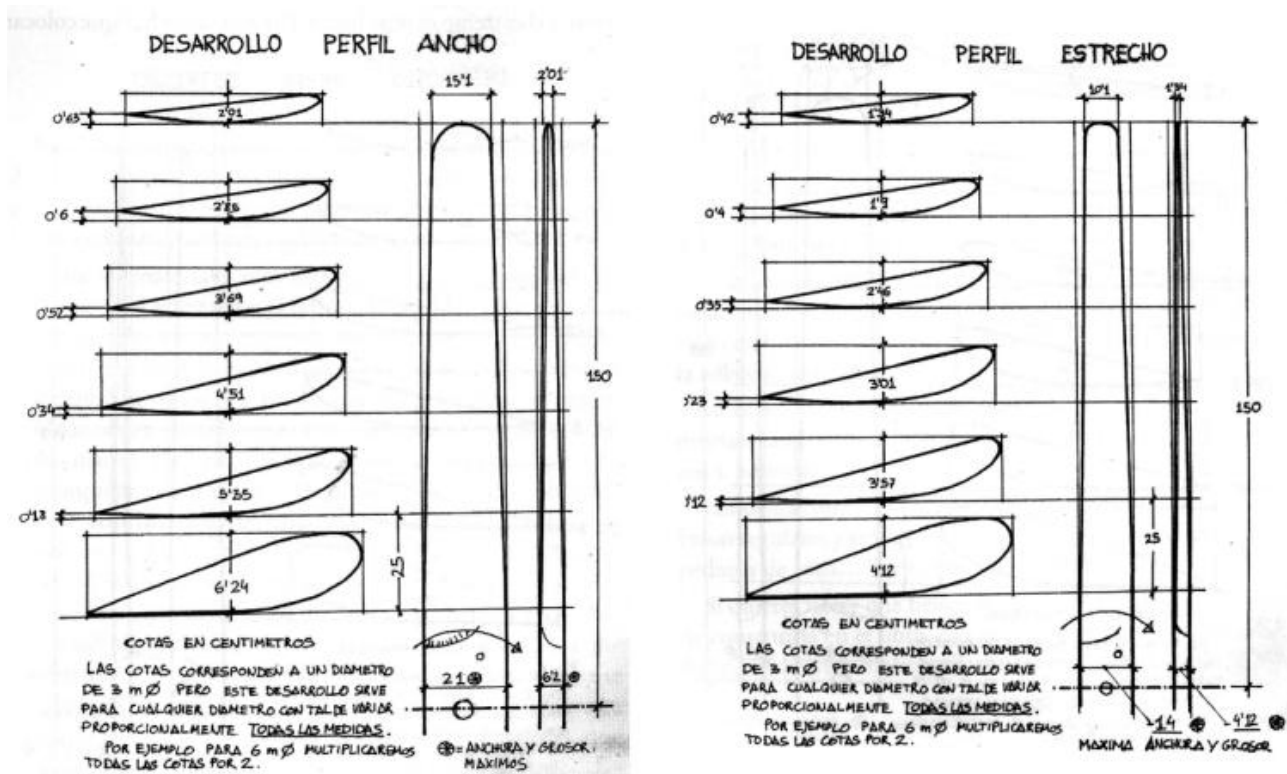


TSR de máximo rendimiento es de 6 y el rendimiento llega al 45% en este punto.

## 2.5 Diseño de las palas

Las palas aerodinámicas se diseñan a partir de perfiles aerodinámicos usados en aviación, los perfiles más habituales son los perfiles NACA y Clark. Para los modelos más pequeños, se utilizan sobretodo los perfiles Clark y NACA 4412, porque el intrados es plano, lo que facilita mucho su construcción.

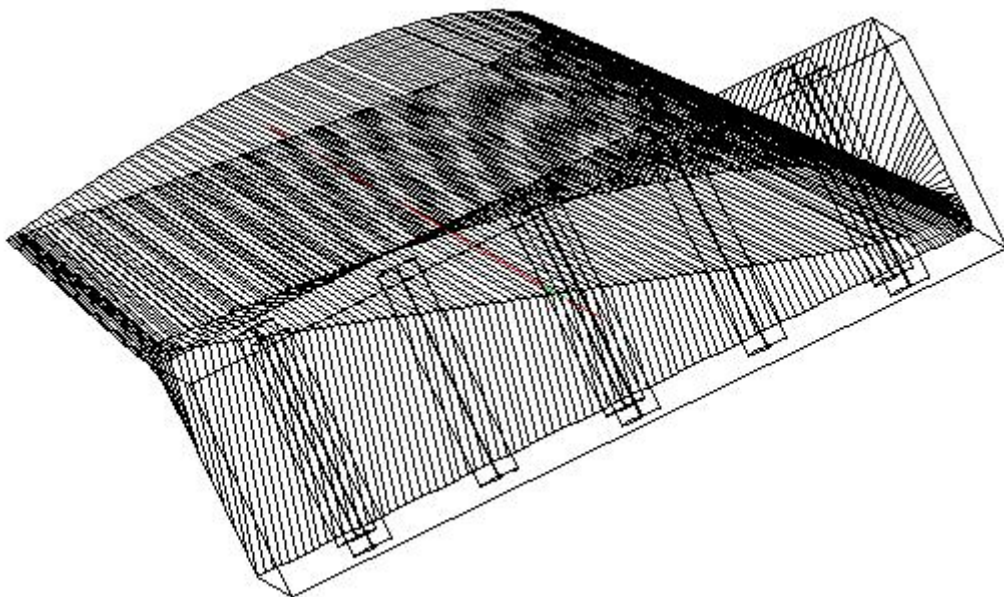
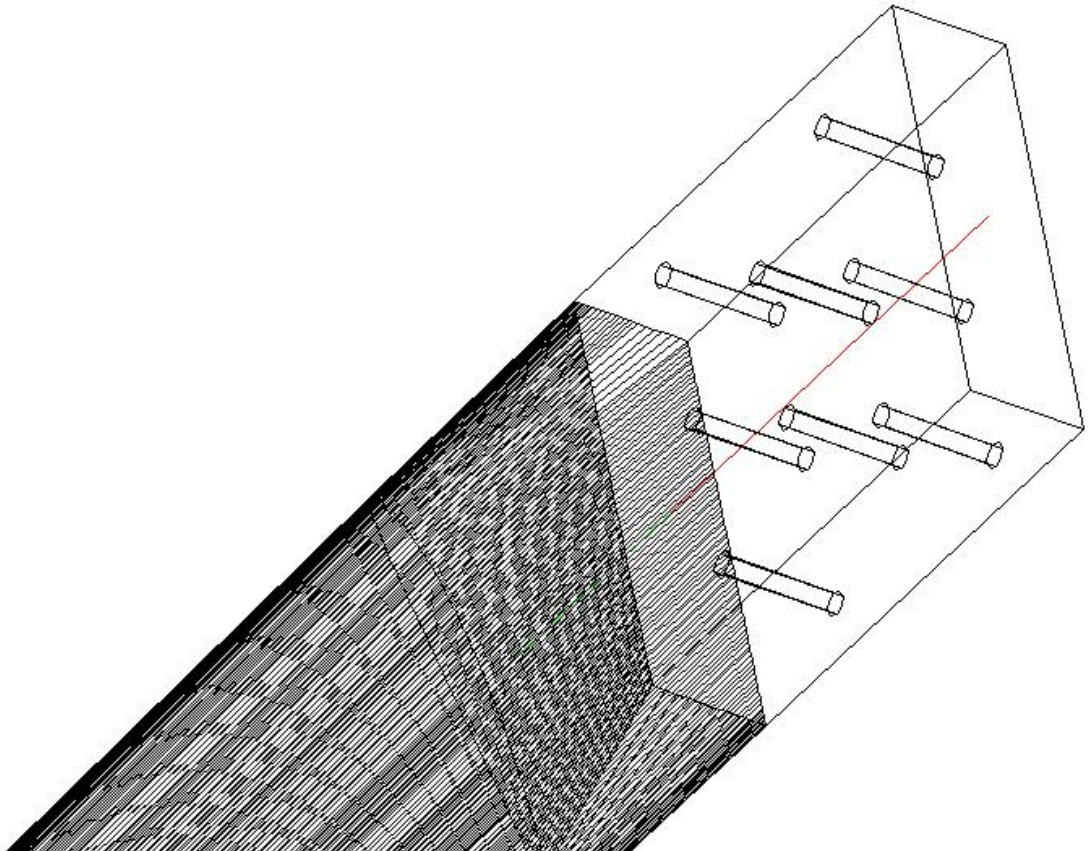
Las palas del aerogenerador de este proyecto están diseñadas basándose en un diseño anterior, extraído del libro "Energía renovable práctica" de los hermanos Iñaki y Sebastián Urquía Lus. Este libro tiene un manual de construcción artesanal de distintos tipos de molinos. En él aparecen dos diseños de pala aerodinámica, uno de perfil estrecho y otro de perfil ancho, el perfil estrecho es mejor, pero tiene menor par de arranque, por lo que el par de arranque del molino tiene que ser mínimo, sino el arranque se produce a una velocidad de viento superior y se desaprovecha mucha energía.



Los dos diseños de pala están hechos con un perfil NACA4412, para hacer las palas en el proyecto se ha re-diseñado el perfil estrecho en autocad. Por un lado se ha dibujado la raíz, un bloque rectangular, y después se han colocado los dibujos de los perfiles en una recta, cada uno, en la distancia y ángulo indicados en el modelo de perfil estrecho. Los ángulos y cuerdas de cada tramo del aspa se han obtenido midiendo en el dibujo.

### *Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga*

Para crear un cuerpo a partir de los perfiles, se ha utilizado la función de sollevado, consiguiendo que el programa una todos los perfiles con líneas creando un cuerpo sólido.



En las dos imágenes anteriores se puede ver la forma de las palas, en la primera se distingue la base, una zona de transición hacia el perfil y finalmente una parte perfilada del aspa. En la segunda imagen es donde mejor se puede apreciar la forma del perfil NACA4412. En la punta es mas pequeña y según se acerca a la base aumenta su tamaño y cambia el ángulo.

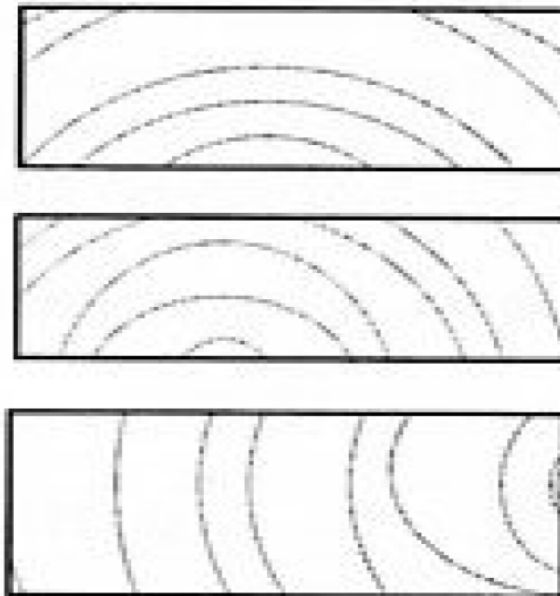
## **2.6 – Construcción de las palas**

### **2.6.1 – Materiales**

Las palas del aerogenerador están construidas con madera de pino y recubiertas con cinco capas de fibra de vidrio con resina de poliéster.

### **2.6.2 – Madera**

Para la construcción de las palas, la madera que se utiliza debe ser resistente y a la vez ligera, sino, tardará más en arrancar. Las maderas más utilizadas son el abeto el cedro y el pino, pero también se pueden utilizar roble americano, fresno, nogal... La madera no debe tener nudos, y en caso de tenerlos, estos deben ser pequeños, ya que estos dificultan el modelado y debilitan la pala. La dirección de la beta de la madera también es importante, aunque algunos manuales de construcción de aerogeneradores no le dan importancia, según como sea esta beta la pala tendrá más o menos fuerza.



Entre los tres tipos de beta que se ven en la imagen superior, la más adecuada es la tercera, ya que sera la que mejor aguante las fuerzas de sustentación. La peor de las betas es la primera, ya que si se alabea, se podría acercar peligrosamente a la torre, chocando contra esta y rompiéndose la pala.

Las palas de madera están hechas en una carpintería con una maquina de control numérico, que construye estas palas según el modelo diseñado en autocad, explicado en el apartado anterior. El material es pino, y tiene algunos nudos, debido a que conseguir unas tablas con las dimensiones necesarias para las palas sin ningún nudo es muy difícil, ya que tendrían que



## Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga

proceder de algún árbol con un diámetro muy grande, lo que supondría un coste muy elevado.

En la siguiente imagen se pueden ver las tres palas, La de arriba tiene una capa de fibra de vidrio aplicada, la segunda también, pero no esta finalizada y la tercera no tiene fibra. Se puede apreciar como tienen algunos nudos. En la siguiente imagen se puede apreciar con detalle la beta de una de las palas, no es el mejor caso para de beta posible, pero tampoco es mala, ya que en el borde de ataque y de salida la beta es bastante vertical (como el segundo caso de la imagen superior)



Para asegurar una vida larga para la madera, antes de aplicar la fibra de vidrio ha sido tratada con un insecticida para evitar la aparición de polilla, termita u otros parásitos y tres capas de barniz especial para exteriores. Para dar mas fuerza y proteger las palas de los agentes externos han sido recubiertas con cinco capas de fibra de vidrio.

## 2.6.2 – Fibra de Vidrio

### 2.6.2.1 – Tipos de fibras

En el mercado hay gran variedad de tipos de fibras, pueden ser de carbono, nylon, fibra, carbono con aramida, vidrio con aluminio...Para la construcción de las palas se ha utilizado fibra de vidrio porque sus propiedades son lo suficientemente buenas para esta aplicación y es barata. Existen varios tipos de fibra de vidrio, las mas comunes son las siguientes:

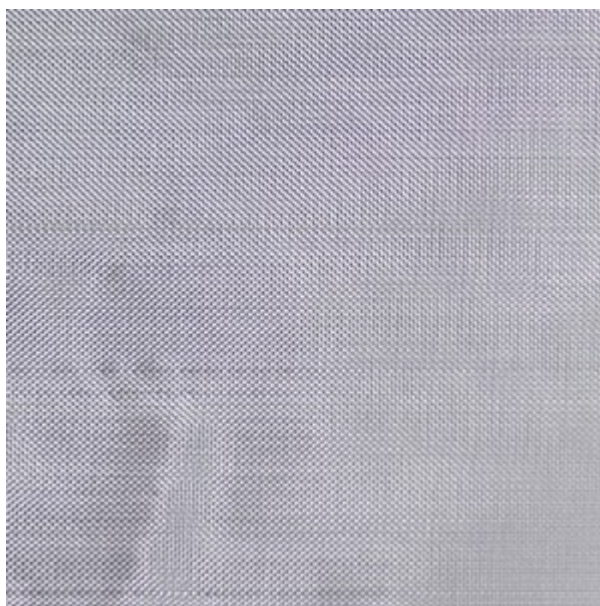
- Mat: Este tejido de fibra se caracteriza porque sus fibras se distribuyen en todas direcciones, el mayor problema que tiene es que el acabado deste tipo de fibra es muy basto, por lo que hay que lijarlo mucho y es un trabajo que ensucia mucho.



*Fibra MAT*

- Woven roving: Este tipo de fibra viene tejido como si fuese tela, las fibras estan en dos direcciones perpendiculares entre ellas. El acabado es muy bueno, por lo que con lijar un poco para quitar la resina sobrante es suficiente. Este tipo de fibra es el que tiene mejores propiedades de resistencia. Es mas cara que el tejido MAT.





*Woven roving*

Para las palas del aerogenerador se ha utilizado fibra de vidrio Woven Roving, porque posee un mejor acabado (imprescindible para las palas) y sus propiedades son mejores.

### 2.6.2.2 – Resinas

En el mercado existen diversos tipos de resinas, para la fibra de vidrio se utilizan dos tipos de resina:

- Resina de poliéster: Esta resina es muy resistente a la humedad, los productos químicos y a las fuerzas mecánicas. Se suele utilizar en construcción de aspas para aerogeneradores, cascos de barcos de fibra de vidrio y muchas más aplicaciones. Esta resina se mezcla con un catalizador y un acelerador para que se endurezca, aunque el acelerador a veces viene mezclado con la resina. Se endurece a temperatura ambiente, y cuando se usa en grandes cantidades se calienta de manera significativa.
- Resina Epoxy: La resina epoxy es impermeable y ofrece una resistencia mecánica mayor que la resina de poliéster. Las utilidades que tiene son parecidas a las de la resina de poliéster. Esta resina también se mezcla con un catalizador y un acelerador y se endurece a temperatura ambiente. El mayor inconveniente de esta resina es su precio, que es aproximadamente tres veces superior que la resina de poliéster.

Para la construcción de las palas se ha utilizado resina de poliéster, es apropiada para esta aplicación, al igual que la resina epoxy, pero su precio es inferior,

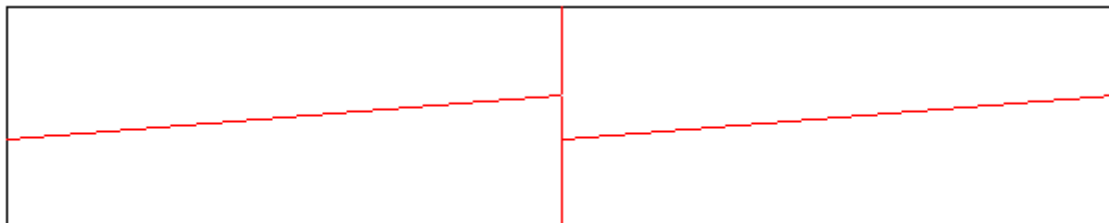
### 2.6.2.3 – Aplicación de la fibra

Para aplicar la fibra se han seguido varios pasos, ya que es imposible aplicar una capa entera de una sola vez, entre una y otra aplicación hay que esperar a que se seque la resina. La mezcla de la resina se ha hecho siempre en cantidades pequeñas para evitar que se endurezca

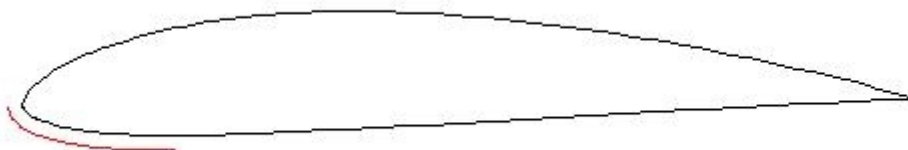


antes de ser aplicada. Los pasos para la aplicación son los siguientes:

- Cortar la fibra: La fibra de vidrio viene en placas de 1x5m, que hay que cortar en cuatro partes, como se puede ver en la siguiente figura. Se corta de esta manera para asegurar que cada trozo de una vuelta entera a la pala, pasando dos veces por el borde de ataque, que es la parte de la pala que más sufre, por lo que tiene que ser la más resistente. Los trozos de fibra que salen del corta tienen forma de trapecio rectángulo, con una base de 2,5m y los lados de 40 y 60 cm.



- Primera aplicación: Se coloca la fibra borde el borde de ataque y se le aplica resina solo por un costado, de unos 4 o 5 cm de grosor, a la hora de aplicar la resina hay que tener mucho cuidado para que no quede ninguna arruga en la fibra, si esto ocurre se forman bultos en el asa que empeoran su aerodinámica y la fuerza que puede soportar la fibra disminuye. En los 2cm más próximos a la punta del asa no se aplicara resina en ningún paso, esta parte se deja para el último momento. En la próxima ilustración se puede observar la parte del asa que recubre la fibra en la primera aplicación.

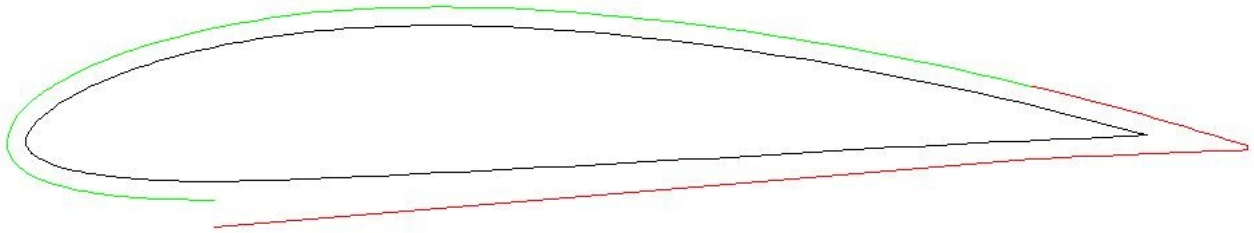


- Segunda aplicación: En esta segunda aplicación se aplica la fibra por todo el extrados, excepto en los 2 o 3cm más próximos al borde de salida. La resina se aplica con un pincel, en una fina capa que moja la fibra, sin llegar a empaparla, para que no se cree una capa muy gruesa de resina. Se aplica del borde de ataque hacia el borde de salida, y de la raíz hacia la punta, sin dar resina en la base, ya que el asa se sujeta con una sargenta por la base. En la próxima ilustración se puede observar la parte del asa que recubre la fibra en la segunda aplicación en color rojo, y la parte que ya tiene la fibra y la resina secas aparece en color verde.

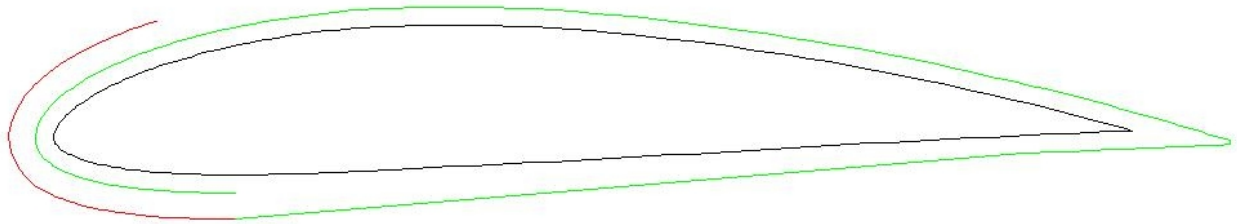


- Tercera aplicación: Antes de aplicar la tercera capa, se gira la pala para que el borde de salida quede arriba. Se aplica resina sobre la parte del extrados que aún no tiene resina, y en el intrados, excepto en los 2 o 3cm más próximos al borde de ataque. La resina se aplica en el mismo sentido que en los anteriores pasos. En la próxima ilustración se puede

observar la parte del aspa que recubre la fibra en la tercera aplicación en color rojo, y la parte que ya tiene la fibra y la resina secas aparece en color verde.



- Cuarta aplicación: En la cuarta aplicación se da resina en el borde de ataque, así se consigue que al dar una capa de resina, se den dos capas en el borde de ataque, que es la parte que más desgaste sufre en el aspa. Antes de dar esta última capa al perfil, hay que volver a girar el aspa, de modo que el borde de ataque quede hacia arriba y cortar la fibra sobrante antes de aplicar la resina. En la próxima ilustración se puede observar la parte del aspa que recubre la fibra en la cuarta aplicación en color rojo, y la parte que ya tiene la fibra y la resina secas aparece en color verde.



- Quinta aplicación: Para esta quinta aplicación la pala se suelta de la sargenta que la agarra y se aplica resina en la base y en la punta. Después de esto hay que lijar el aspa, para eliminar todas las imperfecciones que puedan quedar antes de aplicar la siguiente capa, que se aplica de la misma manera.



En la foto superior se pueden apreciar tres palas. La de arriba tiene la primera capa totalmente aplicada. A la segunda le falta aplicar resina en la punta y en la base y la tercera aún no tiene fibra, solo esta barnizada y tratada contra parásitos. En la siguiente foto se puede ver como se sujeta la pala a la mesa para aplicar resina, es por la presencia de la sargenta por lo que hay que esperar a la quinta aplicación de resina para cubrir la base.





Después de aplicar las cinco capas, se han dado varias manos de resina por todo el aspa para crear una capa de un grosor de 1mm aproximado, para después lijarlo y darle el mejor acabado posible. Después de esto se han pintado las palas.

### 2.6.3 – Unión de las palas al rotor

Hay varias maneras de acoplar las palas al generador, se puede hacer de dos maneras, la primera consiste en enganchar directamente las palas al generador o a una bomba de agua, en el caso del generador es importante que genere una tensión adecuada en las velocidades que trabaja, su mayor inconveniente es que no se puede controlar la frecuencia, si se necesita inyectar tensión a red, habrá que utilizar un convertidor AC-AC. El segundo método consiste en colocar un mecanismo de transmisión entre el rotor y el generador o una bomba de agua, la ventaja de este sistema es que se puede controlar la frecuencia, pero habrá una pérdida de rendimiento en la transmisión. Esta transmisión se puede hacer de varias maneras:

- Dispositivos mecánicos, mediante engranajes, bielas, correas de transmisión, etc
- Dispositivos eléctricos, que proporcionan la velocidad adecuada a la dinamo o al alternador
- Dispositivos hidráulicos, según los cuales el rotor acciona una bomba rotativa o aspirante-impelente

## *Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga*

En el aerogenerador de este proyecto se han conectado las palas directamente al generador, simplificando la construcción. En este caso el hecho de no poder controlar la frecuencia no supone un problema, ya que la tensión primero se rectificara y después se cambiara su valor con un convertidor DC-DC.

La sujeción de las palas al rotor es muy importante, ya que tiene que transmitir la potencia de las palas al eje del alternador y sujetar fuertemente las palas, para que si se embala, las aspas no salgan despedidas.

Las palas se sujetan a dos chapas de hierro 8mm de espesor, con una chapa delante y otra detrás. Cada pala se sujeta con 8 tornillos de 10mm de diámetro, para que los tornillos no se suelten, se aprietan con tuercas de freno, que impiden que los tornillos se suelten.



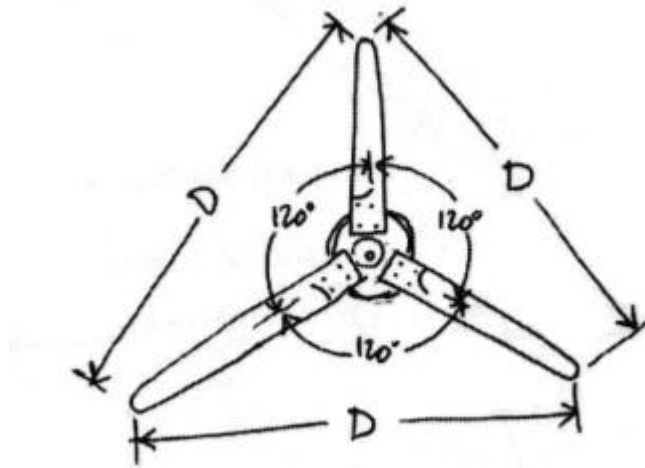
### *Arandela de presión*

La chapa posterior que sujeta las palas esta unida al eje del alternador con un tornillo, que evita que las palas se muevan hacia adelante, la chapa está unida al alternador con un estriado que encaja con el engranaje que tiene el eje. En la parte frontal de las palas hay un capuchino de chapa que tapa los tornillos y mejora la aerodinámica del molino.

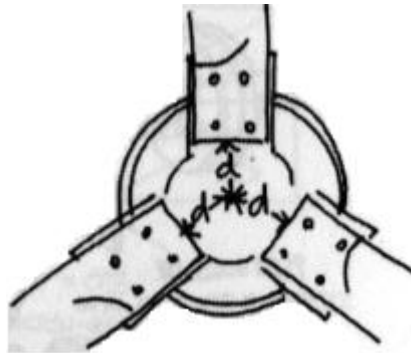


Al colocar las palas hay que asegurarse de que se cumplen los siguientes tres requisitos:

- Colocación simétrica: Las tres palas deben estar situadas a  $120^\circ$  exactos entre ellas y la distancia entre las puntas debe ser la misma en los tres casos

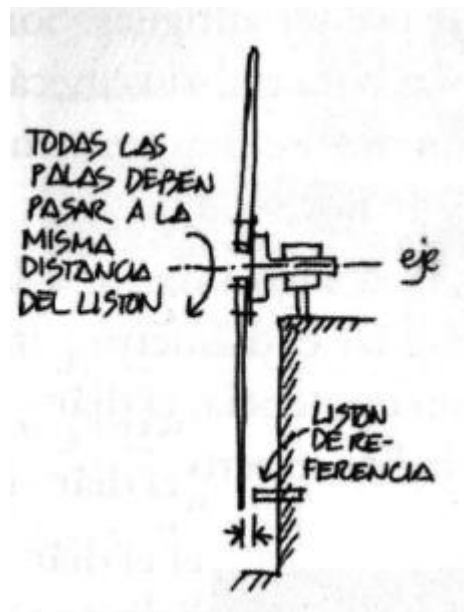


- La distancia desde la base de las palas al centro debe ser la misma para las tres palas, en el caso de este aerogenerador las chapas que sujetan las palas están hechas con una maquina de corte por láser que tiene una gran precisión, y los agujeros de las palas están hechas con una maquina de control numérico, por lo que estos agujeros son muy precisos y las palas están perfectamente centradas.



- Las palas deben girar en un plano perfecto. Esto se comprueba con la hélice montada en el generador. Se va girando lentamente y las tres puntas deben pasara la misma distancia de un listón de referencia.





Las palas del aerogenerador tienen una pequeña flexibilidad, para evitar que estas choquen contra la torre, el eje del aerogenerador se ha inclinado 4° respecto a la vertical, consiguiendo así que las palas estén más alejadas de la torre. Para cerciorarse de que las palas nunca chocarán contra la torre se ha calculado la fuerza que ejerce el viento contra las palas, para ver si estas llegarán a chocar.

Se ha calculado la fuerza que sufren las palas a distintas velocidades, para hacer los cálculos, se ha estimado que el rotor está parado, por lo que la fuerza centrífuga no trabaja estirando las palas y haciendo que estas se separen un poco de la torre. En el cálculo se ha estimado que toda la fuerza que sufren las palas es hacia atrás, esto en realidad no es así, ya que parte de la fuerza es en forma de giro, pero se ha hecho así para ponerse en el peor de los casos. A continuación se muestra la fórmula utilizada para el cálculo de la fuerza.

$$F = p * S \rightarrow F = 0,5 * \rho * v^2 * S$$

El aerogenerador se desorienta a una velocidad de 11m/s. El cálculo se ha hecho para una velocidad de 15m/s y el valor de la fuerza es de 39,9N. Con un dinamómetro se ha aplicado esta fuerza sobre las palas, primero en el centro de gravedad, donde se ha observado que no hay peligro de que las palas choquen contra la torre, después se ha aplicado la misma fuerza en la punta de las palas y se ha visto que no hay peligro, se ha aplicado una fuerza de 110N, que es la máxima que puede medir el dinamómetro y se ha observado que ni siquiera esta fuerza es capaz de hacer chocar las palas.

Con estas pruebas se ha podido ver que no hay ningún peligro de que las palas choquen contra el rotor.

## 2.6.4 – Equilibrado de las aspas

El equilibrado de las aspas es imprescindible en un aerogenerador. El equilibrado consiste en hacer que el centro de gravedad de las palas esté exactamente en el eje de rotación, si no es así, se produce una vibración al girar el rotor que termina por destruir el molino, normalmente lo

primero que se estropea es la veleta, pero no se puede arriesgar a que esto suceda, sobretodo porque el equilibrado es una tarea simple y rápida que si no se hace puede crear serios problemas.

La necesidad de equilibrado no significa que las palas estén mal hechas, se debe a la diferencia de densidad de la madera, por lo que siempre hace falta un equilibrado. Es preferible tener unas palas mediocres equilibradas que unas palas con una forma perfecta sin equilibrar. El equilibrado de este aerogenerador se ha hecho en dos fases:

### **2.6.4.1 – Equilibrado sobre un punto**

Este método de equilibrado es uno de los más sencillos. Se necesita una barra de hierro vertical que termine en punta. Hay que colocar el dentro del rotor sobre este hierro y nivelarlo con ayuda de un nivel de burbuja. Una vez que está nivelado hay que soltar el rotor para observar hacia donde cae.

Si tiende a caer siempre hacia el mismo punto, significa que el centro de gravedad no está sobre el eje de giro. Si el rotor tiende a caer hacia un lado, hay que poner un contrapeso en el lado opuesto, para conseguir que el centro de gravedad se desplace hacia el eje de rotación.

Hay que repetir este proceso hasta que se observe que el rotor no cae siempre al mismo lado, sino que lo hace de forma aleatoria hacia un lado u otro. Cuando esto sucede significa que el rotor ya está equilibrado. En la siguiente imagen se puede ver la barra de hierro empleada para el equilibrado.



El equilibrado que se ha hecho con este método es bastante preciso, pero aun sí no es perfecto, por lo que se hace un segundo equilibrado más preciso que se describe en el siguiente apartado.

### **2.6.4.2 – Equilibrado preciso.**

Este equilibrado se hace después del equilibrado sobre un punto. Sirve para que el centro de gravedad este exactamente en el centro de rotación. Hay que poner una pala en posición horizontal y colgarle en la base una pesa con un gancho, se aleja poco a poco la pesa del eje, en el momento en el que este peso hace que se mueva la pala se mide la distancia entre la pesa y el eje.

Se repite el proceso en las tres palas, si la distancia que necesita la pesa para mover la hélice es la misma significa que esta bien equilibrado. Si no es así, habrá que añadir una pesa en la base a la pala que mayor distancia necesita para moverse, hasta conseguir que las tres palas necesiten la misma distancia de la pesa para moverse. En este momento el equilibrado sera perfecto.

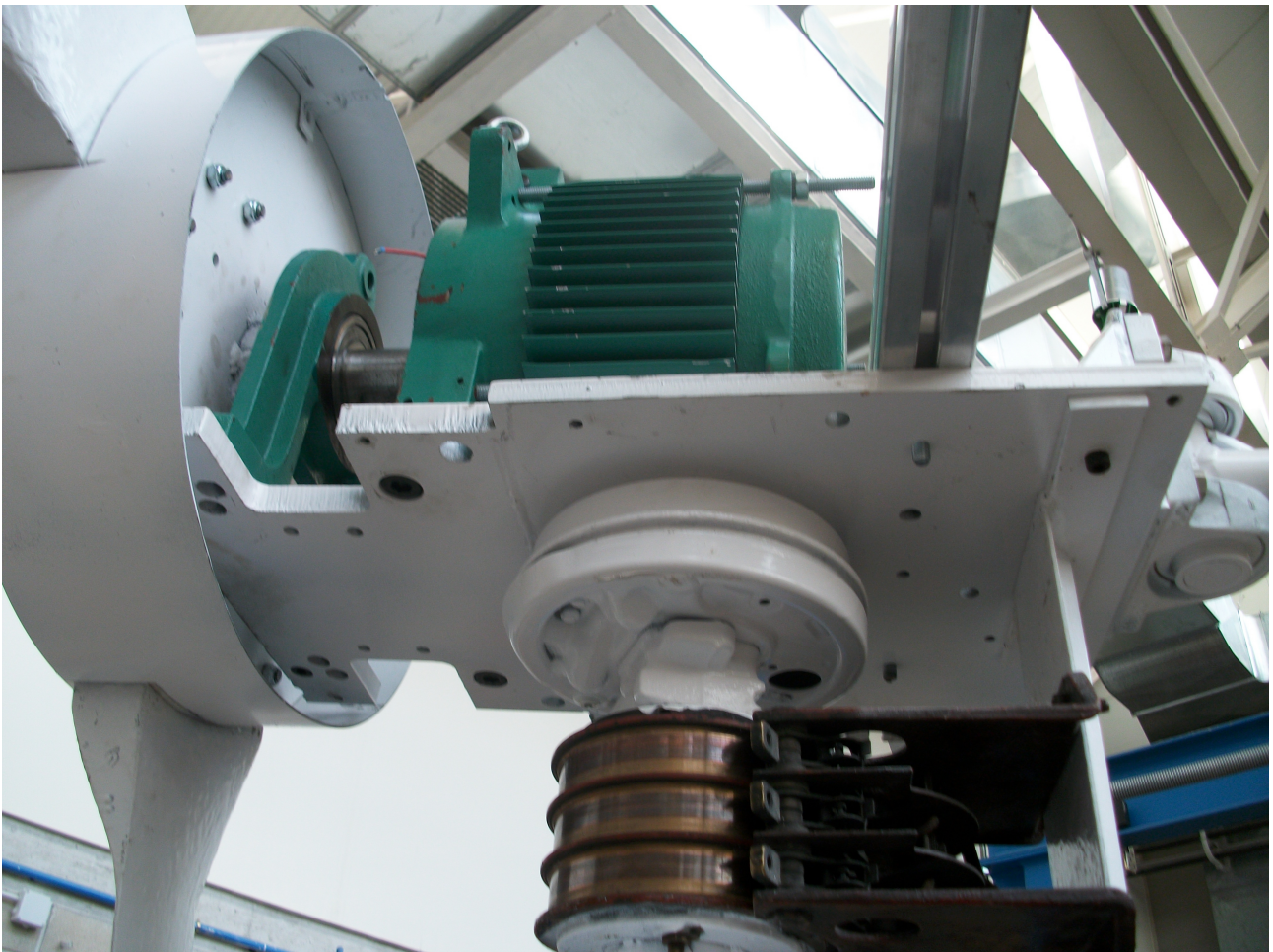


## 2.7 – Góndola

La góndola es el chasis del aerogenerador, en ella están alojados todos los componentes del aerogenerador excepto la electrónica. La góndola de este aerogenerador tiene una chapa de hierro de 15 mm de espesor, al que están unidos todos los componentes.

El generador está anclado con cuatro tornillos a la chapa, en la parte posterior están la veleta y la contraveleta, que es mecanismo que regula el plegado de las palas. La góndola esta cubierta con una chapa , que sirve para proteger el alternador de la lluvia y le da unas mejores características aerodinámicas.

En la parte inferior, a la altura del centro de gravedad del molino, hay un buje trasero de coche que permite que el molino gire para orientarse con el viento. Junto a éste hay tres anillos rozantes con sus respectivas escobillas que permiten la bajada de la corriente.



## 2.8 – Mecanismos de orientación

Uno de los principales problemas que plantean los aerogeneradores de eje horizontal es la necesidad de su orientación, de forma que el viento incida perpendicularmente al disco barrido por

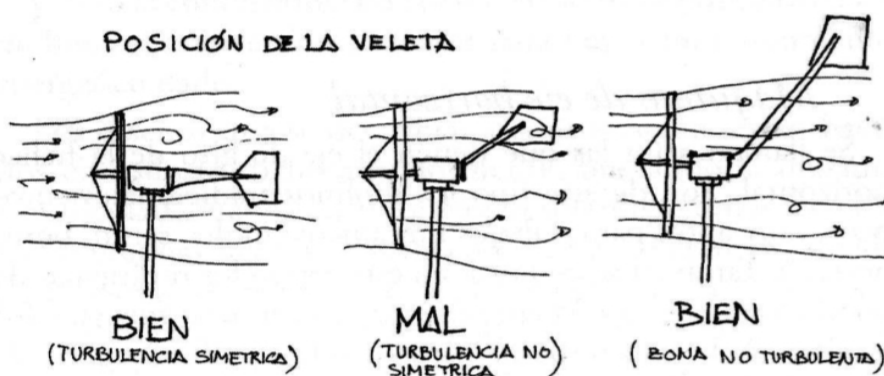
el rotor, con el fin de obtener la máxima potencia. Existen diversos sistemas que permiten la orientación de la máquina, como:

## 2.8.1 - Veleta

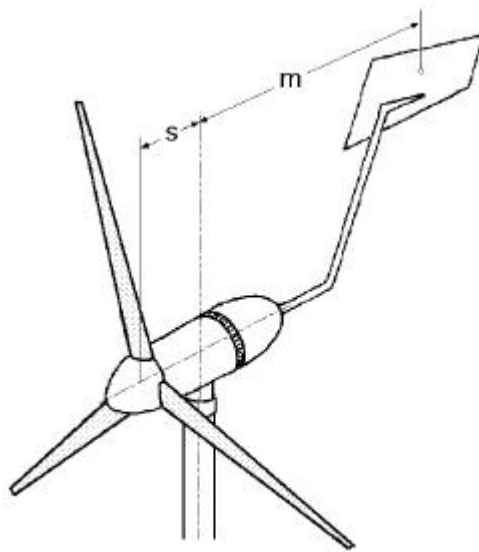
Es el sistema de orientación mas común en los aerogeneradores de pequeña potencia. La veleta se sitúa en la parte posterior del aerogenerador, consiste en una barra metálica en cuyo final se sitúa una chapa o madera, que tiende a orientarse con el viento.

La veleta debe estar perpendicular al plano de la hélice, para que esta este enfrentada al viento. La superficie de la veleta tiene que estar entre un 2 y un 15% de la superficie barrida por las palas, si la superficie es muy grande se orientara muy rápido, pero los vientos turbulentos harán que tiemble, si la superficie es muy pequeña tardará más y la orientación no sera tan precisa, pero no temblará tanto, alargando su vida útil. A la hora de colocar la veleta hay dos cuestiones a tomar en cuenta:

- La altura: la veleta puede estar a dos alturas distintas. Una es la de la góndola, y la otra por encima del punto más alto por el que pasan las aspas. Cuando está a la altura de la góndola, la veleta esta entre turbulencias, pero estas son simétricas, cuando la veleta está por encima de las palas, no ve turbulencias, por lo que funciona correctamente.

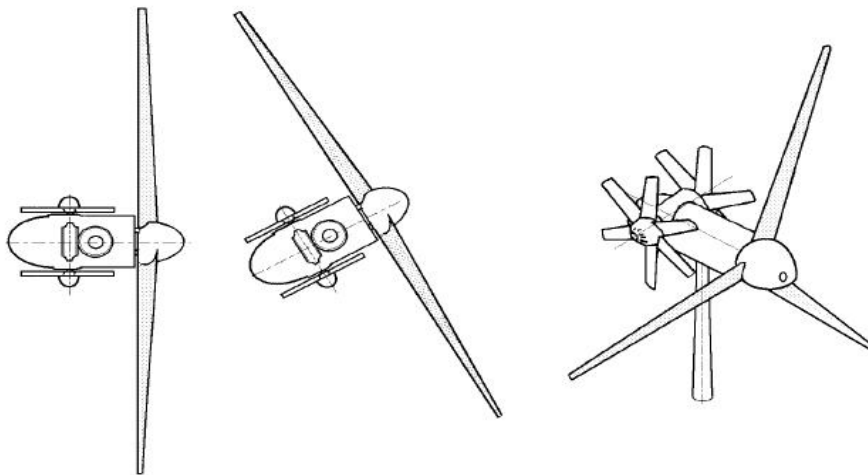


- Distancia de la veleta: Si llamamos  $m$  a la distancia entre el centro de gravedad de la placa que conforma la veleta y el eje de giro vertical de la máquina y  $s$  a la distancia entre el plano barrido por las palas y dicho eje de giro se debe cumplir que,  $m = 4 s$ .



### 2.8.2 - Rotores auxiliares

Otro procedimiento de orientación de los aerogeneradores consiste en la utilización de dos rotores auxiliares colocados en un plano perpendicular al de la hélice, uno a cada lado de la góndola. Cuando éste no esté correctamente orientado, los rotores auxiliares comenzaran a girar haciendo que la maquina se oriente correctamente.



### 2.8.3 - Servomotor controlado electrónicamente

Es el sistema que se utiliza para aerogeneradores de gran potencia. En la góndola de estos se coloca una pequeña veleta, esta manda una señal, que una vez procesada, mueve un motor hasta orientar el molino con el viento.



Este sistema solo se utiliza en aerogeneradores de gran potencia, ya que su instalación en pequeños aerogeneradores es económicamente inviable. Una desventaja importante es que este sistema de orientación consume parte de la potencia generada por el molino para mover la góndola, aunque en comparación con la potencia generada su importancia es mínima.

## **2.8.4 - Rotor a sotavento**

Un aerogenerador cuyo rotor esta colocado a sotavento de la torre se orienta el sólo automáticamente. En estos casos es importante que tanto la góndola como la torre presenten poca resistencia al aire, para que la interferencia de la góndola y la torre sea mínima.

Un inconveniente es que si el molino, al reorientarse da muchas vueltas en un sentido, los cables que conducen la corriente pueden sufrir una torsión excesiva, llegando a romperse estos.

## **2.8.5 - Sistema de orientación adoptado**

En el caso del aerogenerador de este proyecto se ha escogido el sistema de orientación por veleta, por ser el más adecuado de los sistemas anteriormente citados. La superficie de la veleta es del 3% de la superficie barrida por el aerogenerador, las orientaciones son lentas y no muy precisas, pero el efecto de las turbulencias es menor, así se consigue que los esfuerzos de fatiga que sufre el molino sean menores. La relación  $m=4s$  también, para la longitud de cola también se cumple. Los bordes de la veleta se han hecho redondeados para que la probabilidad de que un rayo impacte sobre el sea menos, ya que



## 2.9 Sistemas de regulación de la velocidad de giro

Un dispositivo muy importante en un aerogenerador eólico es el que permite la regulación y control del número de revoluciones, que además sirve de protección de dicha máquina para velocidades del viento superiores a las admisibles bajo el punto de vista estructural.

Cuando una máquina está sometida a una determinada velocidad del viento, comienza a girar; dicha velocidad es la velocidad de conexión, pero su giro es lento y la máquina está lejos de generar su máxima potencia. A medida que la velocidad del viento aumenta, el rotor gira más deprisa y la potencia que produce también aumenta; a una determinada velocidad (nominal), el rotor gira a las revoluciones precisas para que la máquina proporcione su potencia nominal y a partir de este momento, aunque aumente la velocidad del viento, no interesa que la velocidad de giro aumente, por lo que hay que actuar sobre ella regulando su velocidad, lo que a su vez regulará la potencia.

Si la velocidad del viento sigue aumentando, el rotor puede peligrar desde el punto de vista estructural siendo muy importante disminuir las vibraciones; por eso, cuando esta velocidad aumenta mucho, el rotor se tiene que frenar. La velocidad a la que el rotor inicia la parada es la velocidad de desconexión.

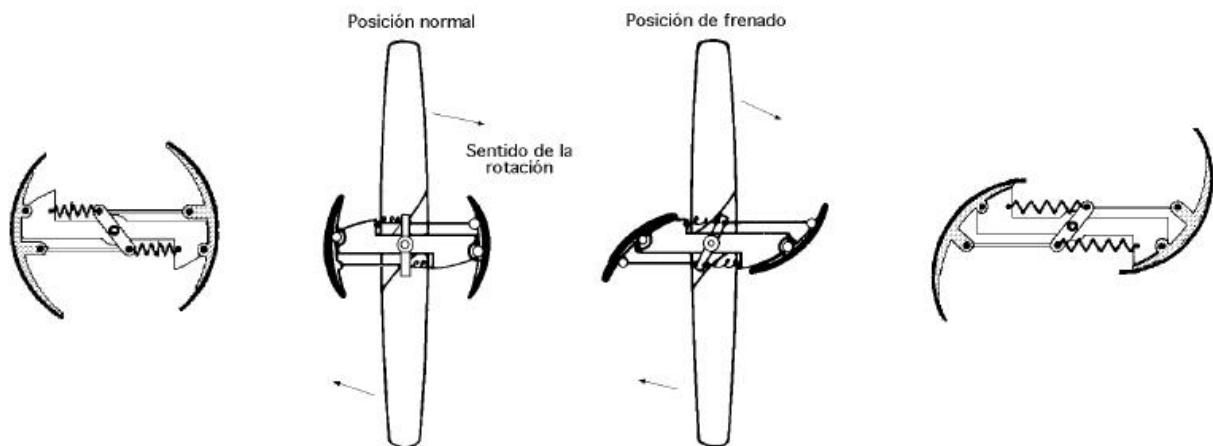
En las primeras aeroturbinas el paso de la pala era fijo por lo que las ráfagas de viento

provocaban fuertes sobrecargas mecánicas sobre los componentes de la turbina, que tenían que estar sobredimensionadas. Con la introducción del paso variable se limitan las cargas máximas en la turbina, y con esta innovación comienza el proceso de disminuir los esfuerzos mecánicos que se generaban durante las ráfagas de viento en los momentos en que su velocidad media era del orden de la nominal, iniciándose también el proceso de ofrecer rotores de varios diámetros para adecuarse a las condiciones del emplazamiento.

La energía de las ráfagas de viento, que son críticas si la velocidad del viento está por encima de la nominal, se emplea en aumentar la energía cinética de rotación del rotor, y no en esfuerzos en los elementos mecánicos (ejes, rodamientos, multiplicador). A este sistema de deslizamiento variable se le dio el nombre de Opti-Slip. Para las máquinas eólicas que accionan un generador eléctrico existen diversos sistemas de regulación, tales como:

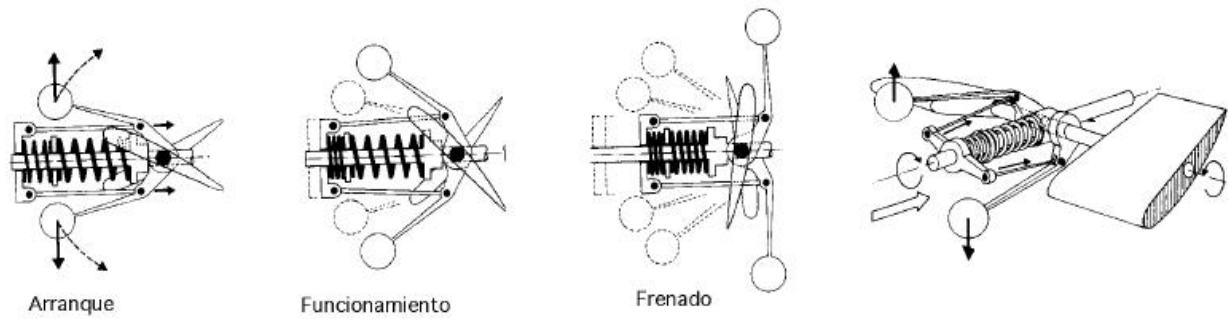
### 2.9.1 – Regulación por frenos aerodinámicos

Es un sistema de frenado que se activa por fuerza centrífuga, cuando la velocidad de giro es inferior a la de desconexión, los frenos no oponen resistencia y cuando la velocidad del aerogenerador llega a la de desconexión, los frenos actúan para que la velocidad de giro no aumente con la del viento. Se utilizan tanto en bipalas como en tripalas. En la siguiente imagen se puede ver su funcionamiento.



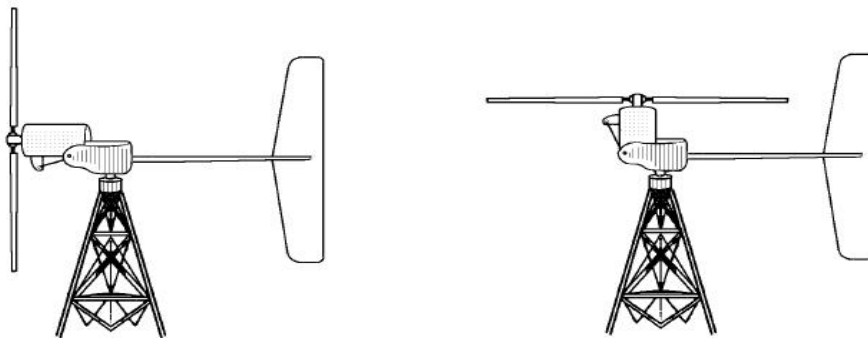
### 2.9.2 – Regulación por palas orientables

Es un sistema de regulación utilizado tanto en pequeños como en grandes aerogeneradores. Consiste en girar las palas cuando la velocidad del viento es alta, así la potencia disminuye y las palas no se embalan. En el caso de los aerogeneradores de pequeña potencia, la orientación de las palas se hace con un sistema centrífugo y en el caso de los aerogeneradores de gran potencia, las palas se giran con un servomotor.

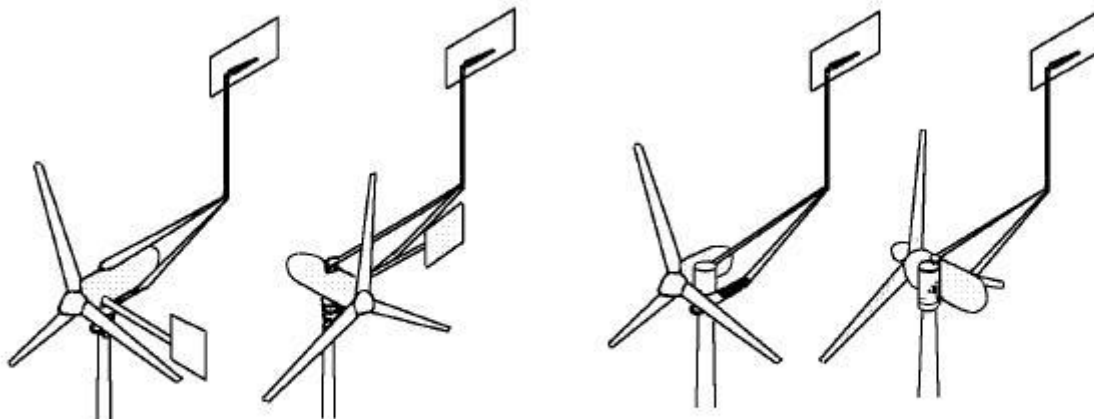


### 2.9.3 – Regulación por orientación del rotor.

Este sistema se utiliza en aerogeneradores de baja potencia, es el sistema más utilizado para estos aparatos. Cuando la velocidad del viento comienza a ser peligrosa para la hélice, se orienta de manera que la superficie de viento que la atraviesa sea mínima. Se hace girando el eje de rotación, se puede girar solo el eje o todo el aerogenerador. En las siguientes imágenes se pueden ver distintas maneras de hacerlo:



Regulación por giro de la hélice de 90° respecto a un eje horizontal



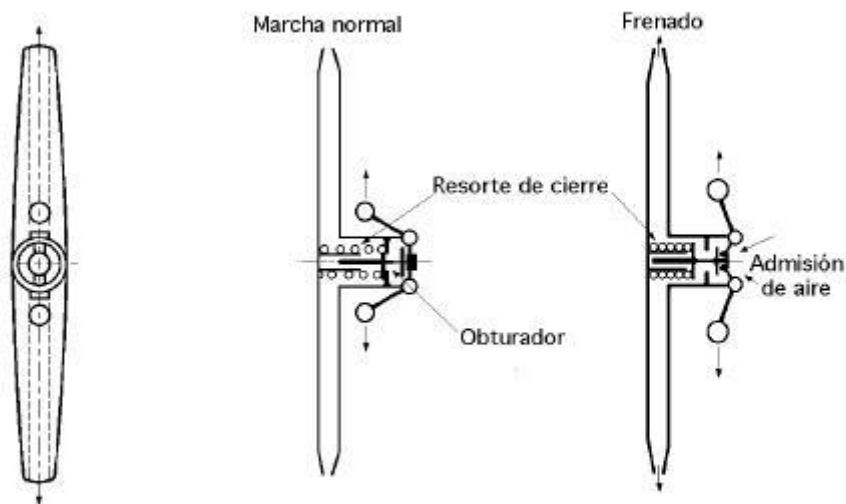
Veleta auxiliar

Empuje aerodinámico sobre una excéntrica

En todos los casos, se coloca un muelle que hace que el rotor esté orientado con el viento, cuando el viento aumenta su velocidad, el mecanismo de desorientación vence la fuerza del muelle y desorienta el rotor.

## 2.9.4 – Frenado aerodinámico por palas huecas

Para este tipo de frenado es necesario que las palas sean huecas, con un conducto de aire que va desde la raíz hasta la punta. En la parte de la raíz se coloca una compuerta que impide que el aire circule por dentro de la pala, cuando la velocidad aumenta, un sistema centrífugo abre la compuerta y el aire empieza a circular desde la raíz hacia la punta debido a la fuerza centrífuga, esta corriente de aire impide que las palas se embalen.



Sistema de regulación por palas huecas

## 2.9.5 – Cortocircuito del generador

Este método solo se puede utilizar en aerogeneradores de aspas aerodinámicas. La tensión de un generador es función de su velocidad, cuando el generador se cortocircuita, la tensión del generador es cero, por lo que no gira. Cuando se cortocircuita, las palas salen de su régimen aerodinámico y no hacen fuerza.

En el caso del resto de generadores no se puede hacer esto, ya que generan mucho par, giran y terminan por quemar el generador. El mayor inconveniente que tiene es que cuando la velocidad del viento es superior a la de desconexión el molino deja de generar.

## 2.9.6 – Sistema de regulación adoptado

Para el aerogenerador de este proyecto se ha escogido el sistema de desorientación por veleta desorientadora. Una vez montado el mecanismo de seorientación, se ha colocado un



muelle que empuja la veleta a su posición normal, en la que orienta el aerogenerador.

Con la ayuda de un dinamómetro, se ha medido la fuerza necesaria para que se active el sistema de desorientación que son 15N. Para que el aerogenerador se desoriente a la velocidad deseada el centro de gravedad de la contraveleta tiene que estar situado en el punto donde se ha medido la fuerza con el dinamómetro.

Para calcular la superficie necesaria lo primero que hay que saber es la velocidad de viento a la que se quiere desorientar el aerogenerador. En nuestro caso esto se hace a una velocidad de 11m/s, por lo que hay que calcular el valor de la superficie de la contraveleta para que a una velocidad de 11m/s la fuerza que haga sea de 15N. El valor de la fuerza ejercida por el viento es el cociente entre la presión y la superficie, desarrollando a partir de la siguiente fórmula se ha calculado el valor de la superficie de la contraveleta.

$$F = p * S \rightarrow F = 0,5 * \rho * v^2 * S$$

Con esta formula se ha calculado que la superficie de la contraveleta tiene que ser de 0,23m<sup>2</sup>. Se ha preparado un chapa de 0,3x0,75m que se ha colocado en el aerogenerador. Es muy importante que está chapa esté colocada fuera de la superficie barrida por las palas, porque sinó reduciría el rendimiento de estas.

## **2.10 – Bajada de la corriente.**

Para bajar la corriente generada de la góndola a la base de la torre hay dos métodos. El primero es el que se utiliza en aerogeneradores de gran potencia, consiste en bajarlo con cables por el dentro de la torre, según va girando el molino para orientarse, estos cables también giran, si se giran demasiadas veces en un mismo sentido pueden sufrir mucha fuerza de torsión y romperse, en los aerogeneradores de gran potencia, el sistema de control cuenta las vueltas que tiene el cable para evitar que esto suceda. En las maquinas más pequeñas se deja el cable suelto y de vez en cuando hay que soltar el cable en la parte inferior de la torre, para desenroscar las vueltas del cable, si se descuida este aspecto se pueden soltar los cables y las consecuencias pueden ser nefastas para el molino porque este se embalaría y se podría romper.

El segundo método consiste en colocar unos anillos rozantes con unas escobillas, de esta manera no importa si el molino gira muchas veces en un sentido. Los aerogeneradores de gran potencia no utilizan este sistema, ya que el precio de unos anillos por los que tiene que pasar una corriente tan grande es inviable.

En el aerogenerador de este proyecto utiliza unos anillos rozantes de bronce, que se han comprado en una empresa de motores eléctricos, estos anillos proceden de un motor asíncrono de rotor bobinado. Las escobillas son de grafito, se colocan dos escobillas por cada anillo, para aumentar la superficie de contacto y así tener menos pérdidas en el transporte de la energía.

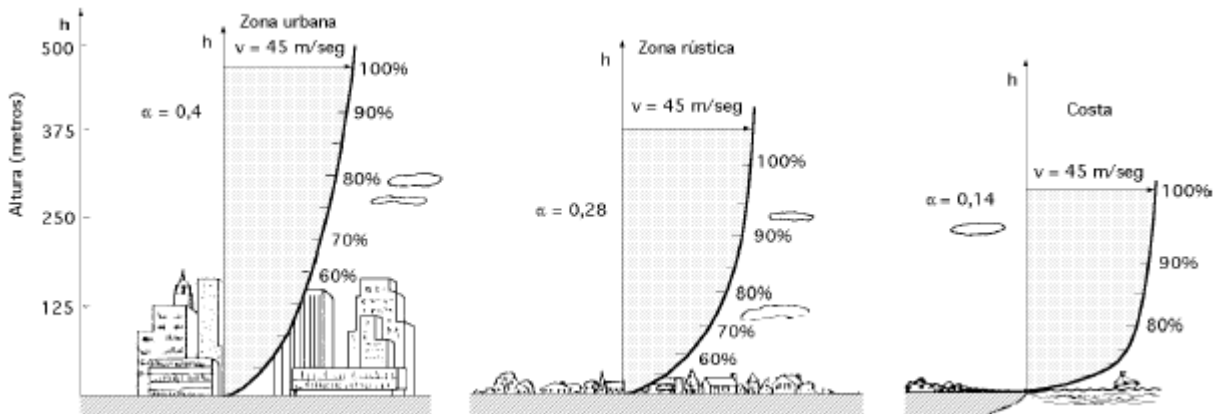




Los anillos están fijados a la estructura de la torre, y las escobillas están unidas a la góndola (parte móvil). Para protegerlos de la lluvia, están cubiertos por una chapa cilíndrica que esta sujeta a la góndola.

## **2.11 – Torres**

Las torres sirven para situar el aerogenerador en una altura en la que el viento sople de manera más constante y con más fuerza. Cuanto mayor es la altura, los vientos son menos turbulentos y más fuertes, hay que buscar una altura, de manera que la relación entre energía generada y los costes de la construcción de la torre sea la óptima.



Las primeras máquinas diseñadas para producir energía eléctrica utilizaron torres con estructuras metálicas o configuración en celosía, posteriormente para máquinas de potencia superior la tecnología ha evolucionado hacia torres tubulares de acero u hormigón. A continuación se indican las particularidades de cada tipo de torre.

## 2.11.1 – Torres de celosía

Este tipo de torre consiste en una estructura metálica en la que se sustenta el rotor eólico y los componentes mecánicos de la transmisión. Este tipo de diseños fue el más empleado en las primeras generaciones de aeroturbinas. Presentan la ventaja de tener un coste reducido, pero tienen una accesibilidad compleja que dificulta las tareas de mantenimiento. El impacto visual de las torres de celosía es elevado a distancias cercanas a la torre, sin embargo este tipo de torre se confunde con el horizonte cuando la máquina se observa a una distancia suficientemente lejana.

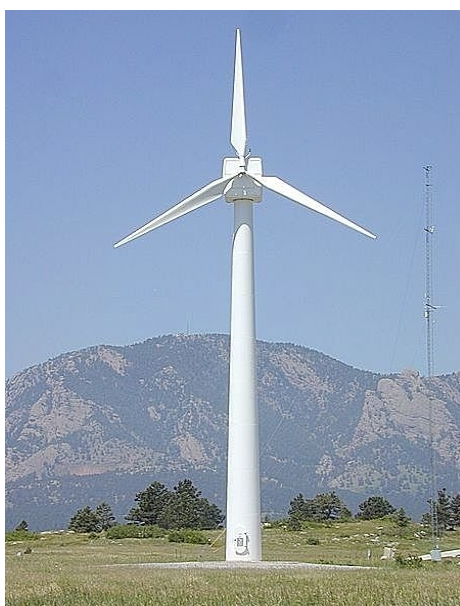


*Aerogenerador de Fuhrlander 2,5MW sobre torre de celosía*

## 2.11.2 – Torre tubular de acero

Este tipo de torre es el más utilizado en la actualidad. Las primeras torres tubulares de acero presentaban una gran rigidez estructural, se diseñaban de tal forma que la frecuencia natural de flexión de la torre fuera superior a la frecuencia de giro de la pala . El motivo de esta elección se realizaba para reducir la posibilidad de excitar esta frecuencia natural del sistema, entrando este en resonancia.

Este diseño rígido da lugar a torres excesivamente pesadas y caras, en especial cuando aumenta su altura. Las nuevas torres tubulares de acero se diseñan de tal forma que la frecuencia natural de flexión es inferior a 1P. El criterio de fabricación más sencillo de las torres tubulares es mediante la unión de varios tramos cilíndricos. El número de tramos habitual suele ser dos o tres, para alturas de torre superiores a 60m. En las torres de altura elevada el diseño suele ser tronco-cónico con chapa de acero de espesor decreciente con la altura para reducir peso.



*Aerogenerador sobre torre tubular  
de acero*

### **2.11.3 – Torre tubular de hormigón**

La configuración de la estructura de la torre con hormigón se puede realizar o bien con hormigón armado u hormigón pretensado. Algunos diseños actuales, en concreto los prototipos: Tjaereborg (Dinamarca), LS-I (Gran Bretaña), WTS-75 (Suecia) y AW-3000, también conocido como Clotilde (Tafalla - Navarra), emplean torre tubular de hormigón.

El hormigón pretensado presenta mejores características para los diseños de torres de elevada rigidez que los hormigones armados y es una opción económicamente competitiva con las torres tubulares de acero cuando éstas se han de diseñar con elevada rigidez.



*Molino Clotilde, situado en Tafalla, su torre es de hormigón.*

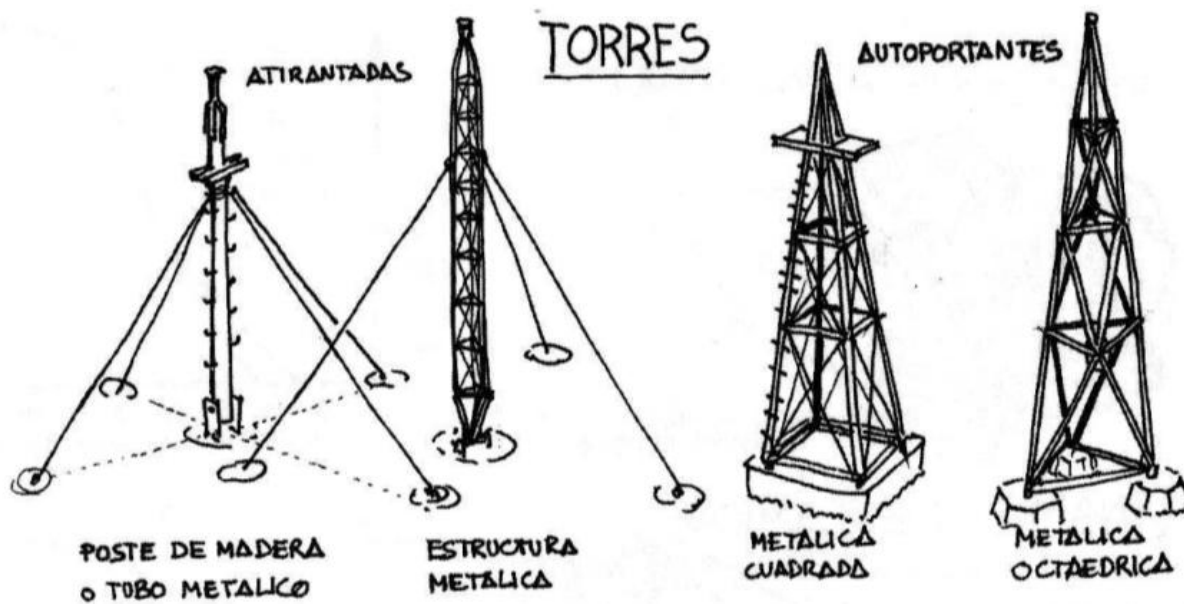
Las torres de hormigón se pueden construir en el propio emplazamiento o se pueden transportar en varios tramos prefabricados. Existen otras configuraciones basadas en la utilización de tensores anclados a tierra para aportar rigidez a la torre, o torres mixtas formadas por un tramo superior de acero montado sobre una base de hormigón. En cualquier caso, ambas configuraciones son diseños muy particulares que no se utilizan actualmente.

## **2.11.4 – Torres de pequeña altura**

Para aerogeneradores de potencias relativamente pequeñas, las torres no tienen que ser muy altas, conque sirvan para salvar los obstáculos que hay alrededor es suficiente. En el caso del aerogenerador de este proyecto, estará situado en la cima de una loma y sin ningún obstáculo cerca. Para pequeñas alturas hay varios tipos de torres:

- Torres atirantadas: son torres que por si solas no son capaces de soportar toda las fuerzas que sufren, por lo que se les ponen unos tirantes, de sirgas de acero para que estas ayuden a soportar la fuerza. Estas torres pueden ser postes de madera, tubos metálicos o estructuras metálicas, El angulo que hay entre los tirantes y la torre, tiene que ser siempre igual o superior a  $45^\circ$ , para que trabajen mejor, y si las torres son altas, se pueden colocar tirantes a varias alturas. Los tirantes se pueden colocar desde 3 o 4 puntos, se pueden colocar desde mas puntos, pero no es necesario. Nunca se deben utilizar torres de hormigón (aprovechadas de líneas aéreas) ya que estos no soportan bien la fatiga.
- Torres autoportantes: estas torres no necesitan tirantes, ya que por si solas son capaces de soportar todas las fuerzas que sufren. Estan construidas con tubos o perfiles metálicos. La ventaja de estas es que no ocupan tanta superficie como las atirantadas, pero son más caras.





## **3º CAPÍTULO - GENERADOR**

## 3.1 – Introducción

En el mercado existe una gran variedad de motores eléctricos, con distintos tipos de construcción y características. A continuación se analizan los distintos tipos de motor y sus características, que los hacen más o menos apropiados para cada tipo de aplicación, y así poder escoger el generador más adecuado para esta aplicación. A continuación se describe el generador seleccionado.

## 3.2 – Tipos de máquinas eléctricas

En el mercado existen muchos tipos motores, algunos de ellos son para aplicaciones muy específicas y otros son más versátiles. A continuación se analizan los tipos de máquinas más comunes y su comportamiento para ser usados como generadores.

### 3.2.1.- Máquina de corriente continua

La máquina de corriente continua es una máquina reversible. La misma máquina puede funcionar como motor o como generador. Está formada por las siguientes partes:

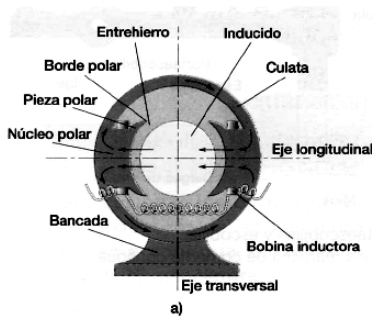
- **Estátor:** También llamado inductor. Está formado por una corona de material ferromagnético denominada culata o yugo en cuyo interior, regularmente distribuidos y en número par, van dispuestos unos salientes radiales con una expansión en su extremo, denominados **polos**, sujetos por tornillos a la culata. Rodeando los polos, se hallan unas bobinas de hilo, o pletina de cobre aislado, cuya misión es, al ser alimentadas por corriente continua, crear el campo magnético inductor de la máquina, el cual presentará alternativamente polaridades norte y sur. Salvo las máquinas de potencia reducida, en general de menos de 1 kW, encontramos también en el estátor, alternando los polos antes citados, otros llamados polos de conmutación cuya utilidad es mejorar la “conmutación” de las escobillas entre distintas delgas.
- **Rotor:** También llamado inducido, es la parte móvil del motor. Está formado por una columna de material ferromagnético, a base de chapas de hierro, aisladas unas de las otras por una capa de barniz o de óxido, se construye mediante chapas aisladas para evitar las pérdidas por corrientes de Foucault. La corona de chapa magnética presenta en su superficie externa unas ranuras donde se aloja el **devanado inducido** de la máquina. Este devanado está constituido por bobinas de hilo o de pletina de cobre convenientemente aislados, cerrado sobre si mismo al conectar el final de la última bobina con el principio de la primera.
- **Colector de delgas:** Constituido esencialmente por piezas planas de cobre duro de sección trapezoidal, llamadas **delgas**, separadas y aisladas unas de otras por delgadas láminas de mica, formando el conjunto un tubo cilíndrico aprisionado fuertemente. El colector tiene

tantas delgas como bobinas posee el devanado inducido de la máquina.

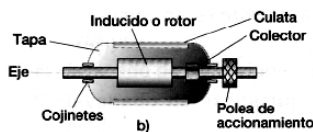
- Escobillas: Dispuestas en los portaescobillas, son de bronce o latón, hacen la unión eléctrica entre las delgas y el colector y el circuito de corriente continua exterior.



Rotor de una máquina de corriente continua.

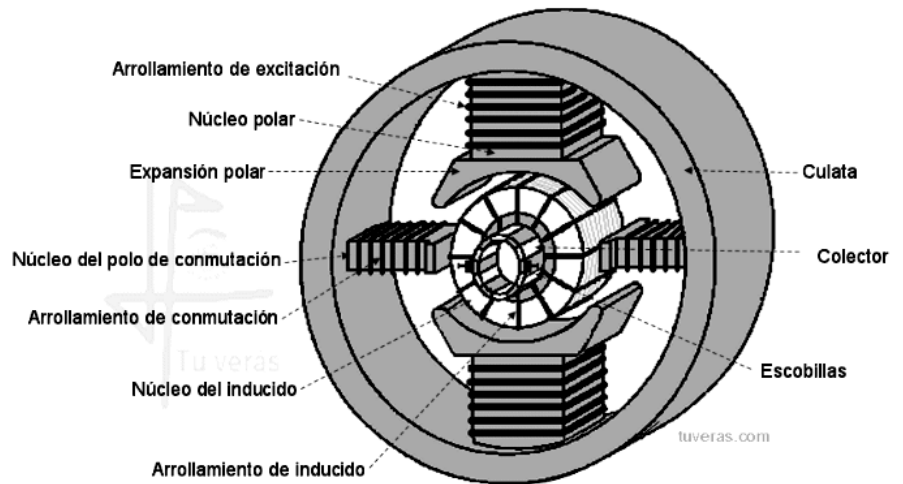


a)



b)

Aspecto constructivo de una máquina de corriente continua.

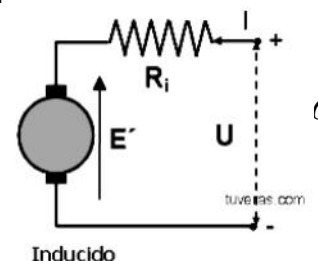
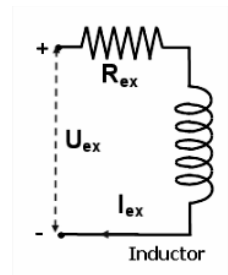


tuveras.com

### 3.2.1.1 - Principio de funcionamiento

Una máquina de corriente continua que funciona como motor o como generador se puede analizar a partir de su circuito eléctrico equivalente. Este circuito sirve para representar el funcionamiento de la máquina en base al equivalente eléctrico de los componentes de la misma. Analizamos la máquina en funcionamiento estable cuando está trabajando con unos valores constantes, ya que en otras situaciones, arranque, aceleración o frenado, el circuito equivalente es algo más complejo.

- Devanado inductor: Como se ha explicado anteriormente, para que una máquina funcione como motor o generador es necesario un campo magnético proporcionado por el devanado del estátor o inductor. Eléctricamente lo podemos representar por una bobina y una resistencia en serie, debido a que está formada por un conductor con una longitud y un valor de resistividad. En régimen permanente, no hay caída de tensión en la bobina, porque la derivada de la corriente respecto al tiempo es nula, podemos representar el devanado inductor por una resistencia, denominada resistencia de excitación  $R_{ex}$ , por

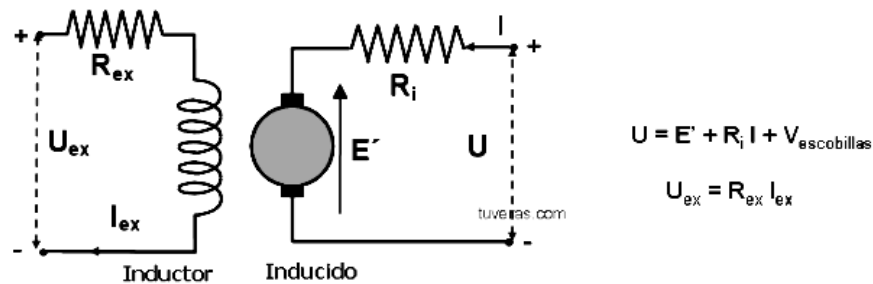


la que circulará una corriente de excitación  $I_{ex}$ . Si la máquina es de imanes permanentes, no tendremos esta resistencia de excitación.

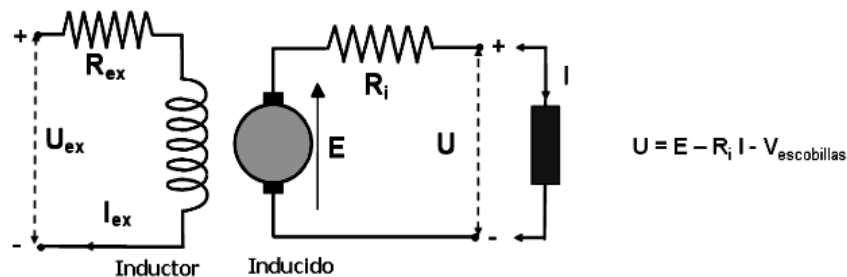
- Devanado inducido: El inducido tanto del generador como del motor está formado por una bobina y una resistencia en serie debida a la resistividad de los conductores  $R_i$ . Además tenemos que sobre los conductores del inducido se está generando una fuerza electromotriz,  $\mathcal{E}$ . En el caso del generador es la que genera la tensión en los bornes del mismo. Si conectamos el inducido a una resistencia circulará una corriente que denominaremos  $I_i$ . Para el caso del motor, también tenemos unos conductores moviéndose dentro de un campo magnético por lo que también se inducirá en ellos una fuerza electromotriz  $\mathcal{E}'$ , que se opondrá a la circulación de la corriente debida a la conexión del mismo con el generador. En este caso el inducido absorbe una corriente que denominaremos  $I_i$ .

En ambos casos se considera una caída de tensión en las escobillas que suele ser de unos 2 voltios. Podemos representar la máquina eléctrica mediante el siguiente esquema:

- Máquina como motor:



- Máquina como generador:



### 3.2.1.2 - La Máquina de corriente continua como generador:

La máquina de corriente continua, a la hora de funcionar como generador, es una máquina



a la que se le debe de inyectar una fuerza motriz, para poder mover el rotor. En el caso de que el estátor este construido con un devanado de inductor, el propio rotor al tener una fuerza magnética remanente almacenado en su núcleo de hierro, este ya sería capaz de inducir al devanado de inducido y a su vez generar tensión. Con esa tensión producida al principio depende de la conexión del inductor el motor estará constituido en serie o en paralelo. De esta forma el devanado inductor se encuentra excitado por el devanado del inducido.

En los motores cuyo estátor está construido con imanes permanentes, el valor de la tensión de salida no se puede controlar, porque el valor de la inducción es siempre fijo. Para cada velocidad de rotación la máquina tendrá una tensión de salida.

### **3.2.1.3 - Ventajas y desventajas del generador de la máquina de corriente continua**

#### Ventajas:

- La máquina de corriente continua genera una tensión rectificada.
- La máquina de corriente continua no necesita excitación exterior.

#### Desventajas:

- Necesidad de un mantenimiento más periódico debido al desgaste de las escobillas.
- Las protecciones en corriente continua son más caras ya cortar un arco eléctrico de corriente continua es más difícil que en alterna, debido a que ni la tensión ni la corriente nunca pasan por cero.
- La máquina de corriente continua es más pesada y más grande que las demás, para una misma potencia.

### **3.2.2 - Máquina asíncrona**

Las máquinas asíncronas tienen un circuito magnético de polos lisos. El rotor y el estator están sometidos a la acción de campos magnéticos giratorios que dan lugar a pérdidas magnéticas. En consecuencia, ambos órganos de la máquina se fabrican a base de chapas delgadas de acero al silicio apiladas para reducir estas pérdidas.

El devanado del estátor normalmente es trifásico, aunque en máquinas de pequeña potencia también puede ser monofásico. El devanado del rotor siempre es polifásico. Ambos devanados tienen el mismo número de polos, que siempre son un número par.

El devanado del rotor forma un circuito cerrado por el que circulan corrientes inducidas por el campo magnético. El rotor puede ser de dos tipos: de jaula de ardilla o en cortocircuito y de

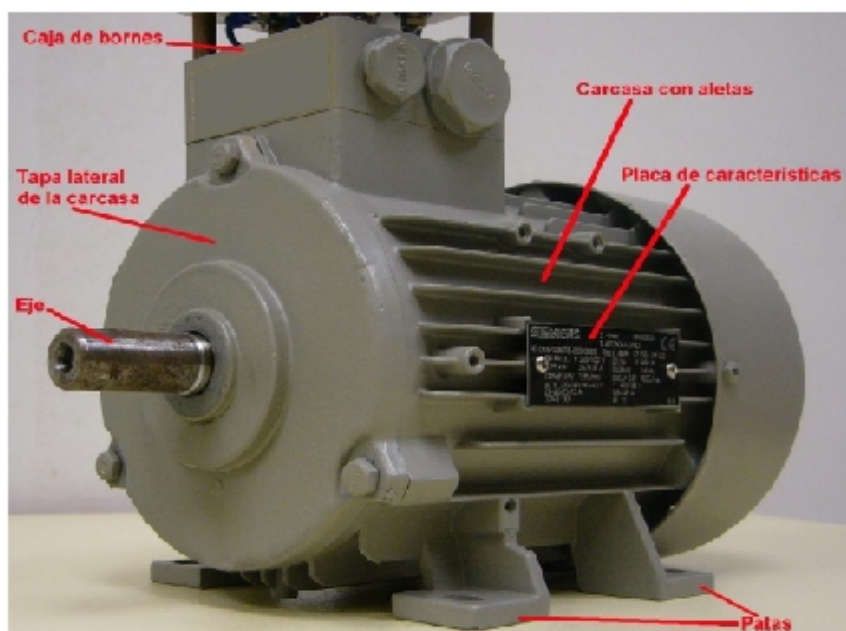
rotor bobinado o con anillos, al que se le pueden conectar unas resistencias rotóricas para un arranque más suave.

Una jaula de ardilla es un devanado formado por unas barras alojadas en las ranuras del rotor que quedan unidas entre sí por sus dos extremos mediante sendos aros o anillos de cortocircuito. El número de fases de este devanado depende de su número de barras. Muchas veces estos anillos poseen unas aletas que facilitan la evacuación del calor que se genera en la jaula durante el funcionamiento de la máquina.

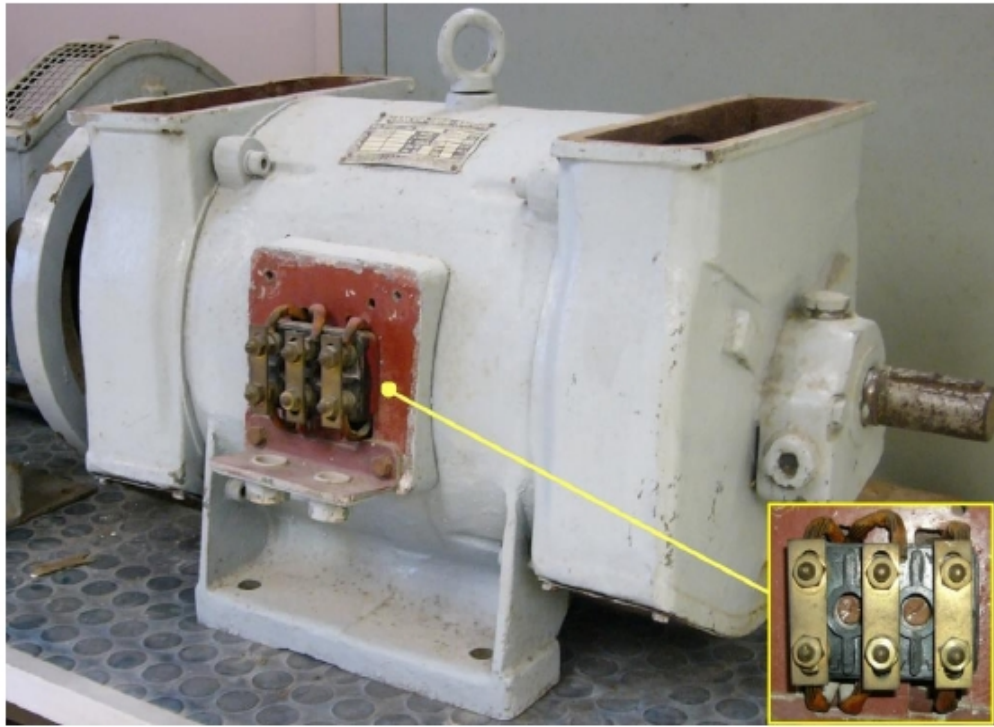
El rotor bobinado tiene un devanado trifásico cuyas fases se conectan al exterior a través de un colector de tres anillos y sus correspondientes escobillas. En funcionamiento normal estos tres anillos están cortocircuitados (unidos entre sí) y para arranques suaves, se les conectan unas resistencias. En ambos tipos de rotor se suelen emplear ranuras ligeramente inclinadas con respecto al eje de la máquina.

El bloque de chapas que forma el circuito magnético del rotor tiene un agujero central donde se coloca el eje o árbol de la máquina. En muchas ocasiones se coloca un ventilador en este eje para facilitar la refrigeración de la máquina.

La carcasa es la envoltura de la máquina y tiene dos tapas laterales donde se colocan los cojinetes en los que se apoya el árbol. Esta carcasa suele disponer de aletas para mejorar la refrigeración de la máquina. Sujeta a la carcasa está la placa de características donde figuran las magnitudes más importantes de la máquina. En la carcasa se encuentra también la caja de bornes donde se alojan los extremos de los bobinados. En una máquina asíncrona trifásica de jaula de ardilla la caja de bornes tiene seis terminales, correspondientes a los extremos de las tres fases del estátor (dos extremos, principio y final, por cada fase), formando dos hileras de tres. De esta forma resulta fácil el conectar el devanado del estátor en estrella o en triángulo.



*Máquina asíncrona*



carga

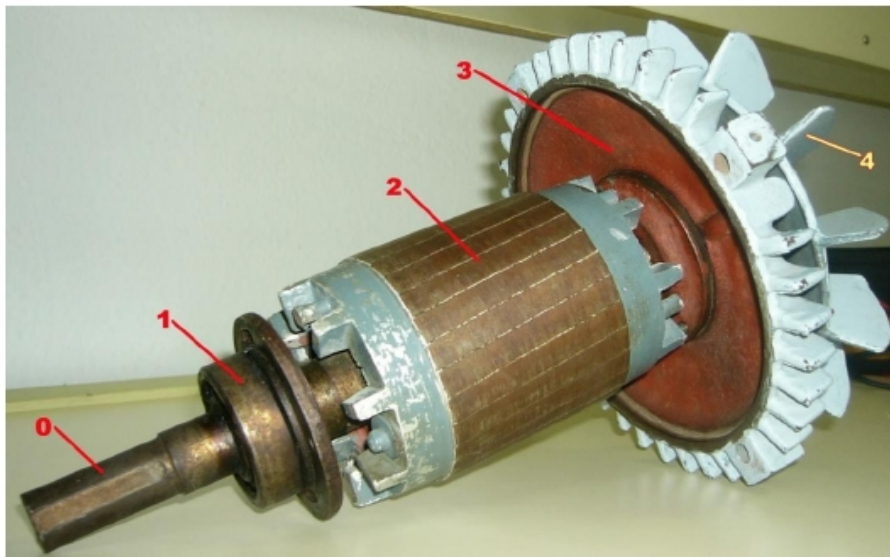
*Conexión del estátor de la maquina asíncrona*



*Aletas de la jaula de ardilla*

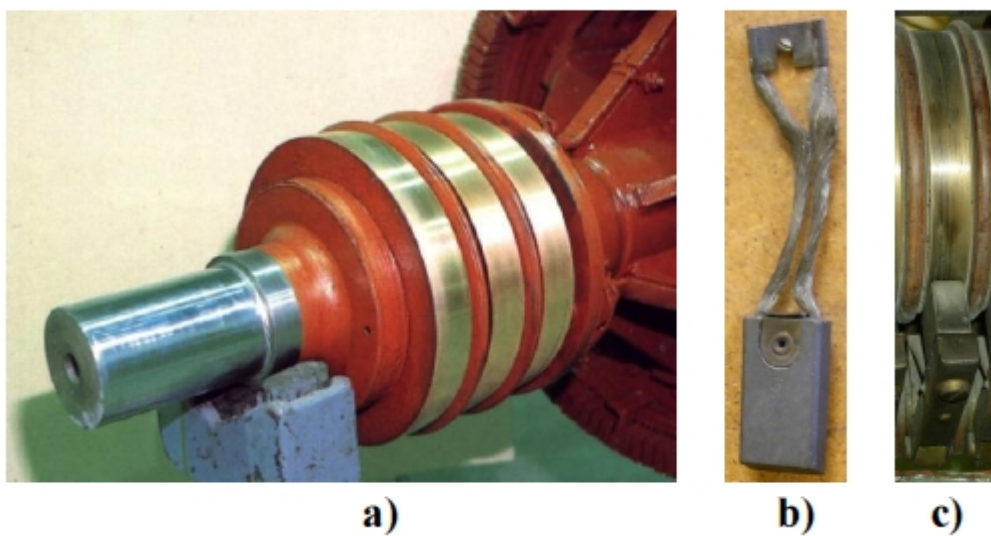


*Rotor bobinado y anillos rozantes.*

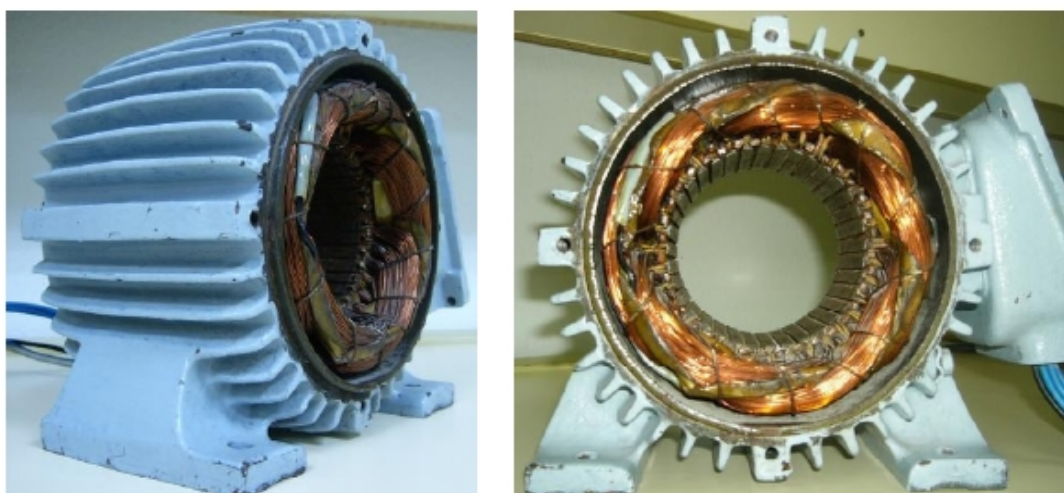


*Eje(0), Cojinete (1), Rotor (2), Carcasa (3), Ventilador (4)*

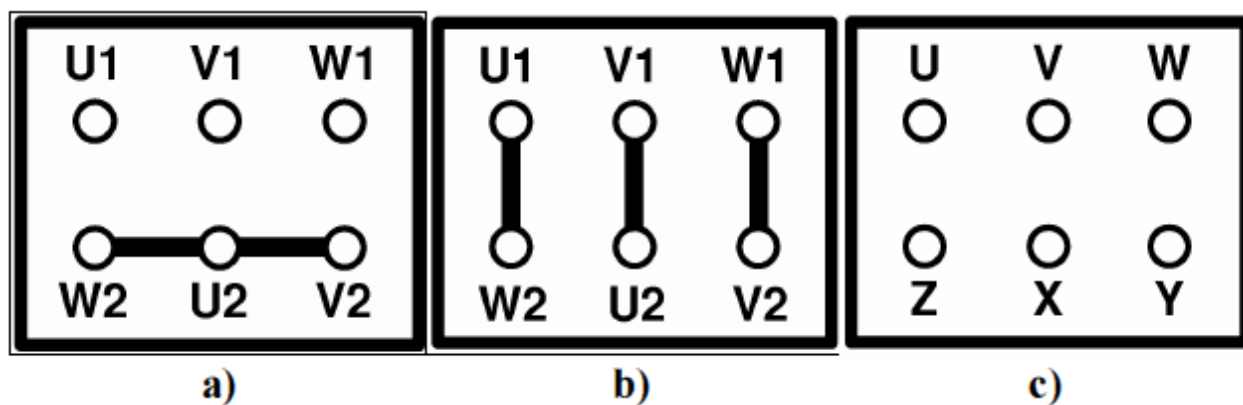




Colector de 3 anillos (a), Escobilla (b), Anillo con escobilla (c)



Carcasa y estátor



Distintas conexiones del estátor de una máquina asíncrona



En la imagen superior se pueden ver los distintos tipos de conexión de una máquina asíncrona, que en el caso de la máquina síncrona es igual. En la primera imagen aparece la conexión en estrella, en la segunda aparece la conexión en triángulo y en la tercera aparece la nomenclatura antigua.

Los bobinados se ponen de manera que los dos tipos de conexiones posibles se puedan hacer con facilidad. Esto permite que una máquina asíncrona pueda funcionar con dos tensiones asignadas de línea distintas, que guardan entre sí una relación  $\sqrt{3}$ .

Así, por ejemplo, un motor de 400/230 V tiene una tensión asignada de fase de 230 V. Por esta razón, cuando se quiera utilizar en una red cuya tensión de línea sea 230 V se empleará la conexión triángulo, porque la tensión máxima que pueden soportar los bobinados es de 230V. Si se quiere utilizar esta máquina en una red cuya tensión de línea sea 400 V deberá emplearse la conexión estrella, porque la tensión máxima que pueden soportar los bobinados es de 230V.

En resumen, la posibilidad de cambiar de conexión en el estátor permite funcionar a la máquina asíncrona con dos tensiones asignadas de línea diferentes. La menor corresponde a la conexión triángulo. La mayor corresponde a la conexión en estrella.

### 3.2.2.1 – principio de funcionamiento

En este tipo de máquina el bobinado del estátor está recorrido por un sistema equilibrado de corrientes que da lugar, en virtud del Teorema de Ferraris, a un campo magnético giratorio cuya velocidad es la conocida como velocidad de sincronismo. Cuando esta velocidad se mide en rpm se la denomina  $n_1$  y se calcula a partir de la frecuencia  $f_1$  de las corrientes del estátor mediante este cociente:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

Como el rotor gira a una velocidad diferente de la del campo magnético del estátor, sus bobinas están sometidas a la acción de un flujo magnético variable y se inducen f.e.m.s de rotación en ellas. El devanado del rotor está en cortocircuito, luego estas f.e.m.s producen la circulación de corrientes en el rotor que, al interactuar con el campo magnético del estátor, originan un par en el eje de la máquina. Por la Ley de Lenz, este par mecánico intentará reducir las variaciones de flujo magnético en el devanado del rotor y, por lo tanto, tratará de hacerlo girar a la misma velocidad que el campo magnético giratorio (ya que las variaciones de flujo en las bobinas del rotor son debidas al movimiento relativo del campo giratorio con respecto al rotor), pero sin conseguirlo nunca, ya que entonces no habría corrientes en el rotor ni, por consiguiente, par en el eje de la máquina.

La velocidad de estas máquinas es ligeramente distinta de la de sincronismo, de ahí su nombre de asíncronas. Por otra parte, las corrientes que circulan por el rotor aparecen por inducción electromagnética, de ahí su otro nombre de máquinas de inducción.

Cuando la máquina actúa como motor, su funcionamiento más habitual, la velocidad del rotor es inferior a la de sincronismo y se genera un par motor. Para que esta máquina actúe como

generador es preciso moverla con una máquina motriz externa de forma que su velocidad supere a la de sincronismo. En este caso aparece un par de frenado en su eje.

Se denomina **deslizamiento s** a la siguiente relación:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$$

donde:

- $n_1$  es la velocidad de sincronismo medida en r.p.m.
- $\Omega_1$  es la velocidad de sincronismo medida en rad/s.
- $n$  es la velocidad de giro del rotor medida en r.p.m.
- $\Omega$  es la velocidad de giro del rotor medida en rad/s

Los conductores del devanado rotórico ven girar el campo originado por el bobinado del estátor con una velocidad relativa  $n_2$ :

$$n_2 = n_1 - n = s \cdot n_1$$

En consecuencia, como este campo magnético tiene  $p$  pares de polos, sucede que un conductor del rotor en un segundo ha visto pasar frente a él  $n_2 \cdot p$  ciclos magnéticos (cada par de polos constituye un ciclo de la onda del campo magnético en el entrehierro, la cual se va repitiendo en el siguiente par de polos y así sucesivamente en todos los pares de polos de la máquina). Cada ciclo magnético induce un periodo de la onda temporal de f.e.m. al girar por delante de un conductor del rotor. Esto hace que en las fases del rotor se induzcan unas f.e.m.s cuya frecuencia es de  $n_2 \cdot p$  ciclos por segundo; es decir, una **frecuencia  $f_2$**  que medida en Hz (ciclos por segundo) vale:

$$f_2 = \frac{n_2 p}{60} = \frac{(s n_1) p}{60} = s \left( \frac{n_1 p}{60} \right)$$

Luego, teniendo en cuenta la relación (1) se deduce que

$$f_2 = s f_1$$

El deslizamiento  $s$  de una máquina asíncrona en condiciones normales de funcionamiento es pequeño; esto significa que la frecuencia en el rotor  $f_2$  es pequeña, muy inferior a la del estator  $f_1$ .

Las f.e.m.s inducidas sobre las fases del rotor provocan la circulación de corrientes cuya frecuencia también es  $f_2$ . Estas corrientes al circular por las fases del rotor originan, en virtud del Teorema de Ferraris, otro campo giratorio cuya velocidad relativa con respecto al rotor se calcula mediante una expresión similar a (1):

$$\frac{60 f_2}{p} = \frac{60 (s f_1)}{p} = s \frac{60 f_1}{p} = s n_1 = n_1 - n = n_2$$

Su velocidad absoluta se obtiene teniendo en cuenta que el rotor está girando con una velocidad  $n$ :

$$n_2 + n = (n_1 - n) + n = n_1$$

Luego, el campo magnético del rotor gira a la misma velocidad de sincronismo que el del estátor. Al final, se obtiene que el campo magnético total en el entrehierro, debido al efecto conjunto de las corrientes del estátor y del rotor, gira a la velocidad de sincronismo  $n_1$ .

El hecho de que los campos magnéticos del estátor y rotor giren a la misma velocidad es importante, porque así la posición relativa de ambos campos no varía con el tiempo y la máquina produce, entonces, un par constante en el eje (sin pulsaciones en cada vuelta). Esta igualdad de velocidades es debida a que ambos devanados, el del estátor y el del rotor, tienen el mismo número de polos.

### 3.2.2.2 - Motor asíncrono como generador

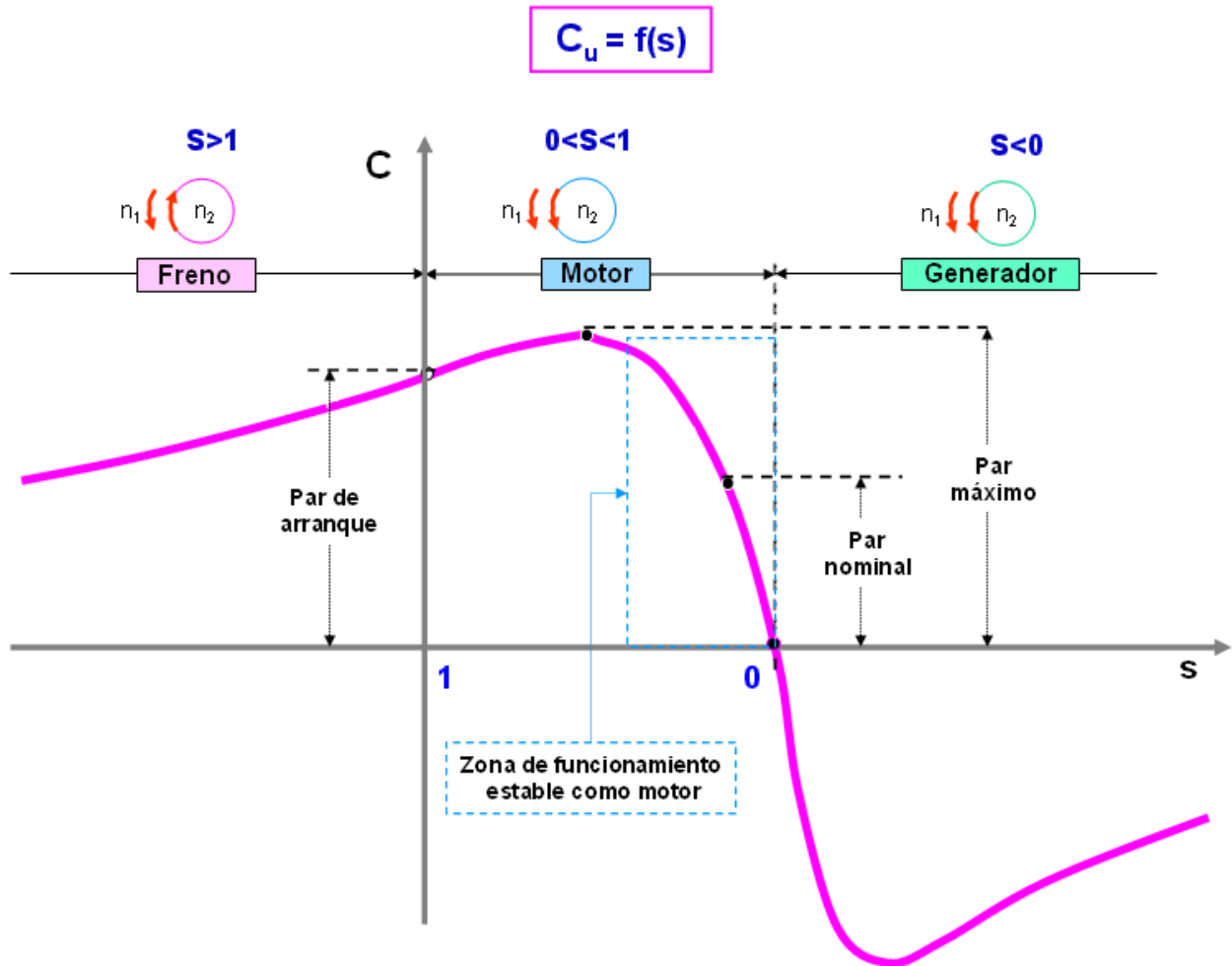
El generador de inducción consume potencia reactiva. Esta potencia suele estar suministrada por la red eléctrica, cuando el sistema de la red eléctrica falla, el generador falla también. Los sistemas electrónicos pueden hacer funcionar a los generadores de inducción, por medio de condensadores para cargar el campo, permitiendo así a estos generadores ser utilizados en redes aisladas.

En este tipo de máquina eléctrica, el campo magnético giratorio se crea a través del estátor, cuyos devanados deberán estar conectados a una fuente exterior de tensión alterna. Esta es la razón básica de que la máquina asíncrona sea consumidora de energía reactiva, ya que al ser el bobinado una carga inductiva, para generar el campo magnético consumirá corriente desfasada de la tensión.

En su uso como generador, el rotor gira debido a la fuerza que le suministra una máquina motriz unida a su eje, en este caso un aerogenerador. El rotor gira en el mismo sentido del campo giratorio, a una velocidad superior a la de sincronismo. El deslizamiento cambia de signo, el sentido de la fuerza electromotriz inducida en la fase del rotor se invierte, al igual que la corriente que ésta determina, ambas tendrán una frecuencia correspondiente a la diferencia de velocidades y la máquina pasará a funcionar como generador, cediendo a la red a la que está conectada la potencia que desarrolla la aeroturbina.

Tal circunstancia, evidentemente, no se da si en la máquina no existe previamente un campo magnético giratorio, lo cual exige que la red suministre a la máquina de inducción la corriente magnetizante que excite el campo magnético. Por ello, el generador asíncrono se define como no autoexcitable. A medida que aumenta la diferencia de velocidad de giro entre el rotor y el campo magnético producido por el estátor, se produce una mayor tensión en el rotor y, consiguientemente crece la corriente que circula por él. Con mayor corriente, el campo magnético debido al rotor también crece y el flujo de potencia activa hacia la red eléctrica será mayor, al igual

que el consumo de potencia reactiva por parte de la máquina. Esta tendencia se mantendrá hasta llegar al par resistente máximo del generador.



Dentro de un rango limitado, la potencia y el par son proporcionales al deslizamiento, obteniéndose una característica ligeramente inclinada. En este tramo la energía reactiva consumida es capaz de mantener el flujo magnético necesario para que el generador presente un par resistente creciente, pero a partir de un determinado deslizamiento (entre el 5 y el 10%, según la máquina) el incremento de la corriente en el rotor hace que las pérdidas debido a la resistencia del mismo (pérdidas Joule), disminuyan el par resistente y, por lo tanto, se puede embalar el rotor. Además, el excesivo aumento de las pérdidas produce un sobrecalentamiento del rotor, que por radiación puede afectar también al estátor.

Este último inconveniente puede reducirse en parte dependiendo del modo de ventilación utilizado y de su propia construcción, ya que si todos los detalles del diseño son conocidos se pueden aplicar límites más ajustados mediante el cálculo cuidadoso de los transitorios térmicos que puedan aparecer.

Por las anteriores razones, no es recomendable operar en el rango cercano al

deslizamiento máximo, aunque también se puede incrementar el deslizamiento para un par dado, aumentando la resistencia de las barras del rotor, pero el producto del par y el deslizamiento creciente representa mayores pérdidas, disminuyendo el rendimiento del generador.

A la hora de seleccionar un determinado generador asíncrono se deberá tener en cuenta el par máximo en tanto por ciento, ya que el coste del generador guarda cierta relación con la raíz cuadrada del par máximo del mismo.

Como recomendación en el proceso de selección, una vez conocida la potencia de la turbina a utilizar el rango de velocidades de viento en el punto de localización y la característica par-velocidad del generador más barato. Normalmente, se dan pocos casos en los cuales una velocidad de viento excesiva haga que el par de la turbina pueda exceder del par máximo del generador, no obstante se debe programar en el control la desconexión de la línea si la potencia máxima se supera durante 10 segundos. Posteriormente, el generador podrá volverse a enganchar a la línea en el momento en que la velocidad de la turbina esté por debajo de la velocidad máxima del generador. Por el contrario, con velocidades de viento muy bajas, la velocidad de la turbina puede llevar a funcionar al generador a velocidades por debajo de la velocidad de sincronismo, invirtiéndose el par generador y poniéndose la máquina a funcionar como motor. Si esta situación se da durante un intervalo de tiempo alto, la máquina deberá ser desconectada de la línea.

Otra característica del generador de inducción es su factor de potencia, el cual varía con la carga. Una excesiva demanda de potencia reactiva es peligrosa, ya que causa caídas de tensión en la línea y en los transformadores. Recordemos que parte de esa corriente reactiva demandada se utiliza como corriente magnetizante para obtener un flujo magnético. La corriente de magnetización para carga máxima varía desde el 20% para generadores de 4 y 6 polos y el 40% para los generadores de 10 polos o más. Respecto al porcentaje que representa la potencia reactiva demandada por el generador sobre su potencia máxima, éste suele suponer entre el 15 y el 20%.

Para pequeños generadores, el consumo de potencia reactiva no es muy importante, pero para grandes máquinas hay que tenerlo en cuenta sobre todo para efectuar la compensación de corriente reactiva en vacío. Esta compensación se realiza mediante baterías de condensadores en paralelo con la línea de salida del generador. La regulación de estas baterías se hace por tensión mediante un relé, el cual desconectará los condensadores si la tensión supera el valor de 1.15 p.u. de la tensión nominal. Esta protección suele estar ajustada para que abra a los 15 ciclos de detectar que la corriente del condensador supera a la de magnetización, o la tensión sube demasiado.

### **3.2.2.3 - Ventajas y desventajas del generador de la máquina asíncrona:**

#### Ventajas:

- Debido al desgaste de del motor, el mantenimiento es prácticamente nulo.



- Fácil de adquirir un motor de segunda mano.
- Son motores baratos.

Desventajas:

- Necesidad de potencia reactiva para poder generar
- No aprovecha bien la energía del viento a bajas revoluciones.
- Necesidad de elevar la velocidad de sincronismo para poder generar.

### **3.2.3- Máquina Síncrona**

La máquina síncrona se caracteriza porque la relación entre la velocidad del motor y la frecuencia es siempre constante, y es función del número de pares de polos. La tensión en la salida es independiente de la velocidad de giro para los motores síncronos de rotor bobinado, pero para los de imanes permanentes, la tensión de salida es proporcional a la velocidad.

Las máquinas síncronas presentan unas características muy buenas para ser utilizadas como generador:

- En sistemas aislados, se puede controlar de forma independiente la frecuencia (a partir de la velocidad) y la amplitud de la tensión (a partir de corriente de excitación).
- Para conexión a red, se puede controlar de forma independiente las potencias activa (a partir de la máquina motriz) y reactiva a partir de la corriente de excitación.

La máquina síncrona domina el mercado de la generación eléctrica, tanto en grandes centrales como en pequeñas centrales y en sistemas aislados. Hay que destacar que la máquina síncrona es menos usual utilizarla como motor, aunque resulte interesante su utilización en algunas aplicaciones, donde sea necesario una relación potencia volumen grande

#### **3.2.3.1 – Principio de funcionamiento**

La máquina síncrona está compuesta por dos partes:

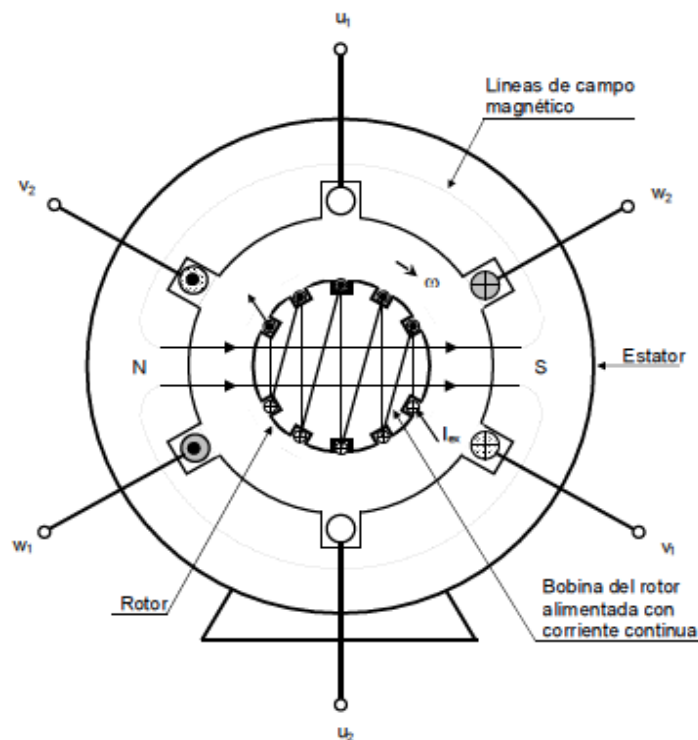
- Una fija o estátor, constituido por un paquete de chapas magnéticas conformando un cilindro con una serie de ranuras longitudinales, sobre las cuales están colocados conductores, conectados entre sí, de forma tal de crear un conjunto de bobinas.

- Una parte móvil o rotor, ubicada dentro del estátor y que consiste en un electroimán alimentado por corriente continua.

El giro del rotor se produce mediante una máquina impulsora (Motor diésel, turbina de vapor, de gas, hidráulica, eólica), que mantiene una velocidad constante. La alimentación del electroimán se logra a través de un par de anillos rozantes que permiten la continuidad eléctrica entre una parte fija y una parte móvil.

Los alternadores de cierta potencia cuentan con excitatriz, que es a su vez un generador de corriente alterna trifásico (Cuyo inductor está montado sobre el estátor del alternador y el inducido sobre el rotor), en cuya salida se encuentra un rectificador trifásico, que alimenta el electroimán, con lo cual se evitan los anillos mencionados, que ocasionan pérdidas en los mismos y desgaste de los carbones.

En la siguiente imagen aparece el esquema de un generador síncrono que presenta solamente 6 ranuras, y sobre cada par de ranuras opuestas se colocan los lados de una bobina, cuyos principios y finales tienen la siguiente denominación:

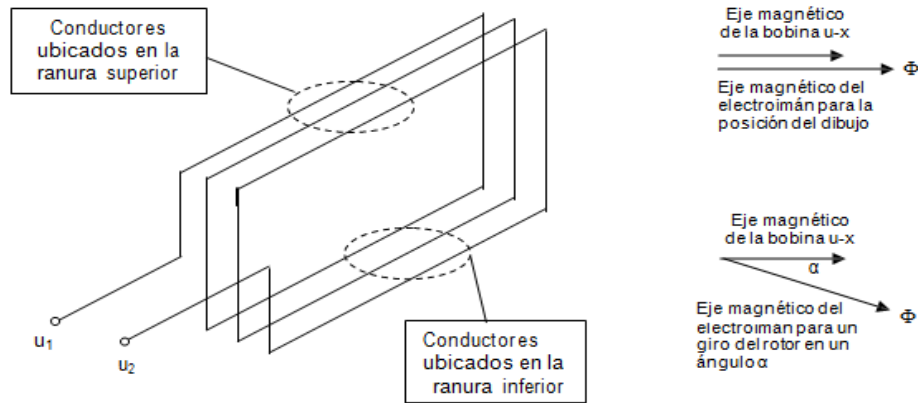


Esquema de un generador trifásico síncrono

Bobina 1:  $u_1 - u_2$   
Bobina 2:  $v_1 - v_2$   
Bobina 3:  $w_1 - w_2$

## Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga

En la siguiente figura se ha esquematizado la bobina 1, donde se puede ver como están ubicados los conductores en las ranuras, siendo las otras dos bobinas idénticas, pero con su ejes magnéticos, formando un ángulo de  $120^\circ$ , entre si. Dado que el electroimán produce un flujo magnético  $[F]$  de valor constante, las bobinas concatenarán un valor de dicho flujo de acuerdo a la posición instantánea del rotor.



Esquema de la bobina U

Si analizamos la bobina u<sub>1</sub> – u<sub>2</sub> de “N” espiras (La cual está representada por una sola espira en el esquema del motor síncrono), y llamamos “a” al ángulo entre el eje magnético del electroimán y el eje magnético de la bobina, el valor del flujo concatenado por la misma para un instante cualquiera está dado por, la proyección del flujo producido por el electroimán sobre el eje magnético de la bobina, o sea:

$$j = F \cos a = F \cos wt \quad \text{Siendo } w \text{ la velocidad angular del rotor.}$$

De acuerdo a la ley de Faraday-Lenz, entre los terminales de la bobina se inducirá una fuerza electromotriz cuyo valor está dado por:

$$e_{u1-u2} = - N \frac{dj}{dt} = N F w \sin wt$$

$$\text{Sustituyendo } E_{\max.} = N F w$$

$$\text{Nos queda: } e_{u1-u2} = E_{\max.} \sin wt$$

Si analizamos la bobina v<sub>1</sub> – v<sub>2</sub>, vemos que el fenómeno se repite pero con un retraso de  $120^\circ$ , debido a la disposición geométrica en que las mismas están colocadas:

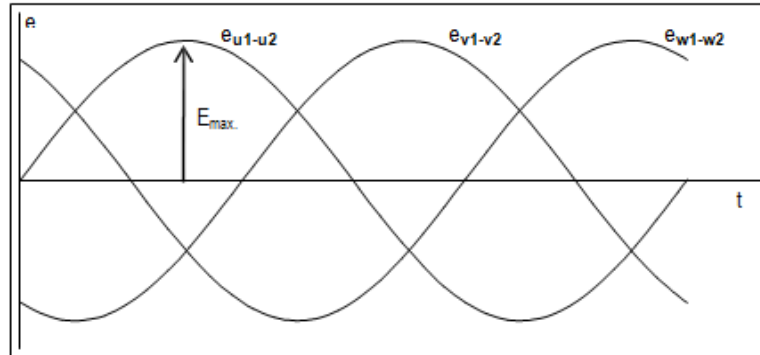
$$e_{v1-v2} = E_{\max.} (\sin wt - 2\pi/3)$$

Lo mismo sucede con la bobina w<sub>1</sub> – w<sub>2</sub>:

$$e_{w1-w2} = E_{\max.} (\sin wt - 4\pi/3)$$

### Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga

De esta manera se ha logrado tener un sistema de tres tensiones alternas desfasadas una de otra,  $120^\circ$  en el tiempo, como puede observarse en la siguiente imagen:



*Sistema trifásico de tensiones*

Si analizamos el valor eficaz de la tensión en bornes de cada una de las bobinas ó fases del generador, el mismo será:

$$E_F = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} \quad \omega = 2 \pi f \quad \text{Siendo } f : \text{la frecuencia}$$

$$E_F = \frac{2 \pi}{\sqrt{2}} \cdot N \Phi = 4,44 \cdot N \Phi$$

#### Frecuencia y numero de polos:

La máquina que analizamos en la siguiente imagen sera de 2 pares de polos magnéticos, y por cada vuelta que efectúa el rotor se genera un ciclo completo de la fuerza electromotriz inducida en cada una de las fases del estátor, por lo tanto si el rotor gira a " $n_s$ " vueltas por minuto, se cumplirán " $n$ " ciclos por minuto, por lo tanto la frecuencia en ciclos por segundo en el estátor será:

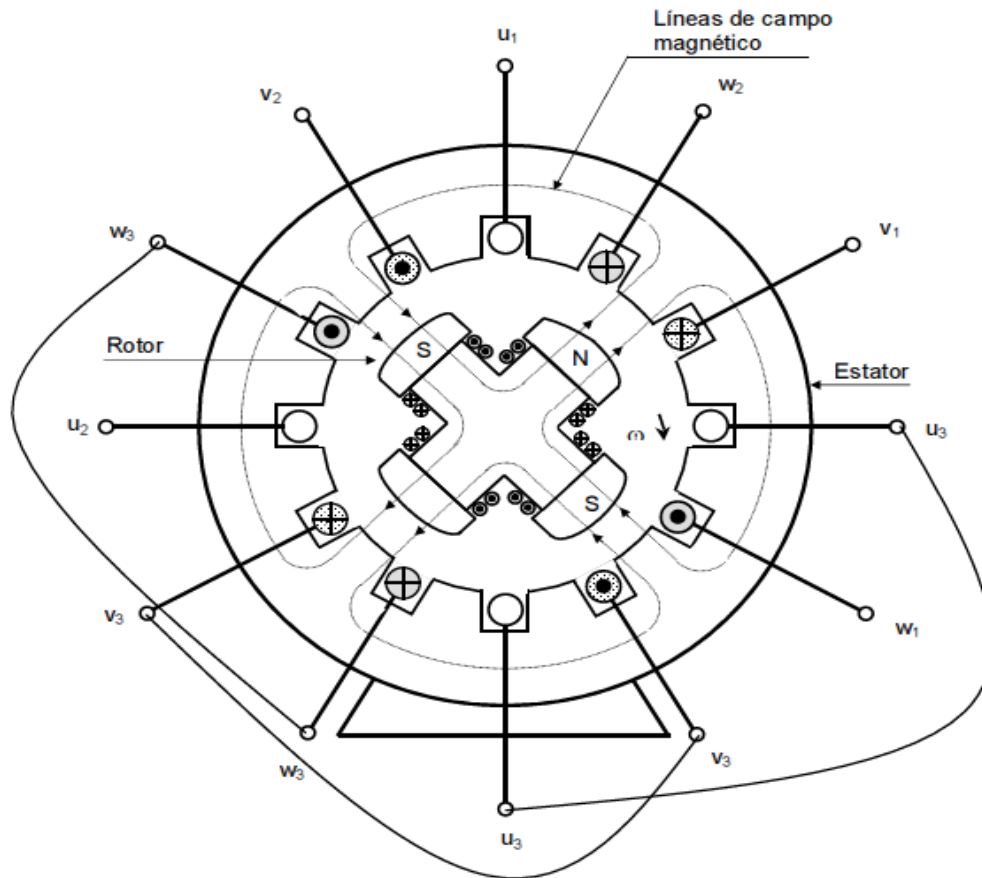
$$f = \frac{n_s}{60}$$

$$f = \frac{n_s \cdot p}{60}$$

Si la máquina tiene mas de un par de polos, la expresión general de la frecuencia obtenida es:

- $f$  : Frecuencia de la fuerza electromotriz inducida en ciclos por seg ó Hercios [Hz]
- $p$ : Cantidad de pares de polos
- $n_s$ : Velocidad de giro del rotor [r.p.m.]

En el siguiente esquema se muestra una máquina de 4 polos (Dos pares de polos):



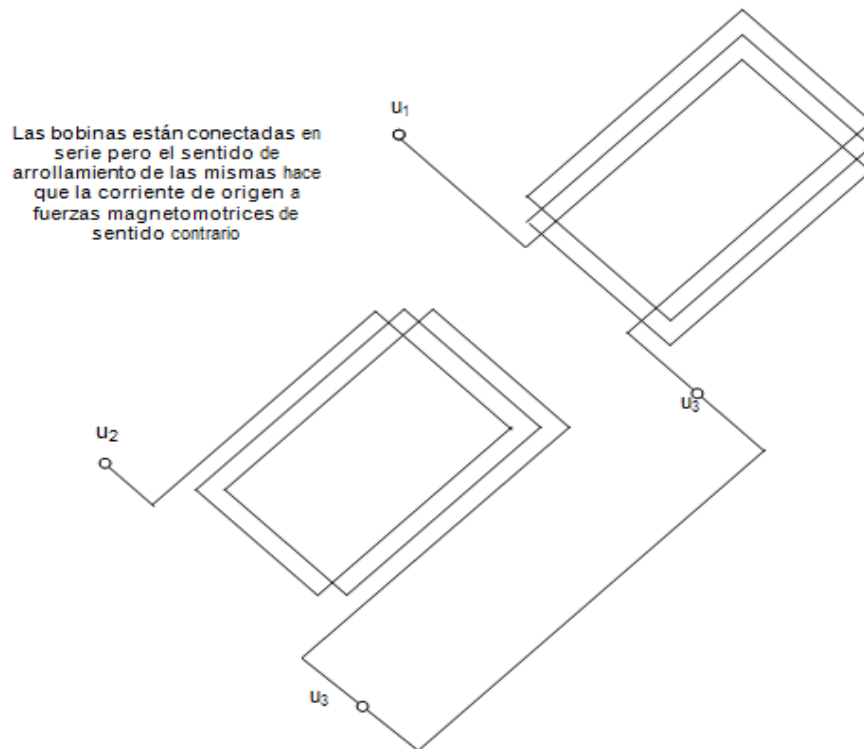
*Máquina síncrona de cuatro polos*

Esta máquina presenta dos pares de polos en el rotor y en el estator. La cantidad de ranuras es el doble que en el caso anterior, de modo que cada fase ocupa el doble de ranuras, estando formada cada una de ellas por dos bobinas conectadas en serie, con el mismo eje magnético, de la siguiente manera:

- Fase 1:  $u_1 - u_3 - u_3 - u_2$
- Fase 2:  $v_1 - v_3 - v_3 - v_2$
- Fase 3:  $w_1 - w_3 - w_3 - w_2$

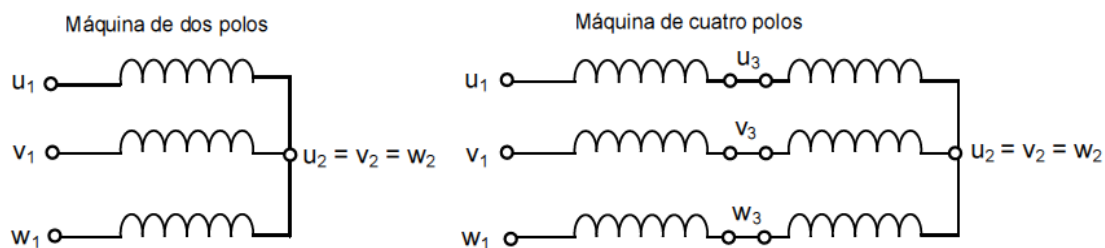
La siguiente figura muestra como está conformada una de las fases, la cual tiene dos bobinas con un mismo eje magnético, pero el flujo originado por las corrientes tiene sentido opuesto.





Esquema del bobinado para una fase

Las tres bobinas del estátor se unen en un punto común ( $x=y=z$  ó  $x_1=y_1=z_1$ ), conformando un tipo de conexión que se denomina “estrella”, como se muestra en la siguiente figura:



Conexión en estrella de los bobinados del estátor

Comparando ambas máquinas podemos observar que en la de dos polos, cada lado de bobina ve pasar un polo (Norte o sur) del rotor una vez por cada vuelta, en cambio, en la máquina de cuatro polos corresponde dos veces por cada vuelta, lo que hace que la frecuencia para la misma velocidad angular sea el doble.

Por lo tanto, para obtener la misma frecuencia, las velocidades del rotor deben ser diferentes, e ir disminuyendo a medida que la cantidad de polos aumenta o sea que la velocidad del rotor para una misma frecuencia es la siguiente:

$$\Omega = f * 60 / (2p)$$

Siendo:

- $\Omega$ =velocidad angular en rpm.
- $f$ = Frecuencia en Hz
- $2p$ =numero de pares de polos

Además la relación entre los grados geométricos de giro del rotor y los grados eléctricos de la fuerza electromotriz es:

$$\text{"Grados eléctricos"} = 2p \text{ "Grados geométricos"}$$

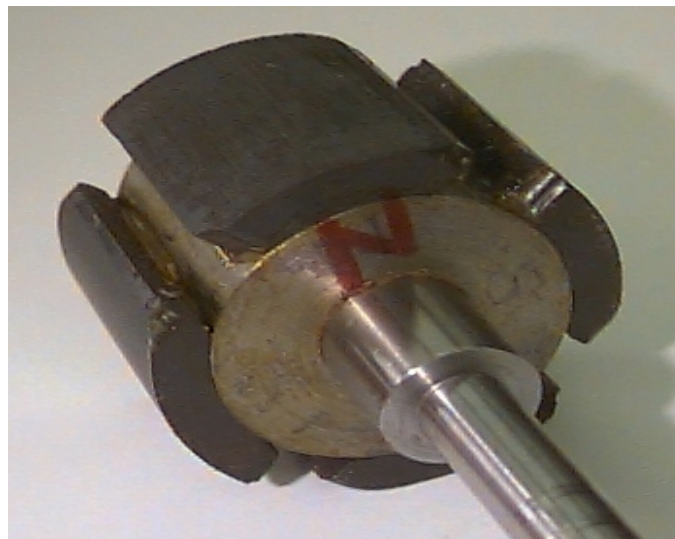
Las máquinas accionadas por turbinas de vapor o gas son de alta velocidad, por lo que en estas aplicaciones se utilizan maquinas de uno o dos pares de polos, con lo cual el rotor presenta la forma de un cilindro ranurado (Rotor liso), como se represento en el primer esquema, por lo que las exigencias de equilibrio dinámico sean mejor satisfechas.

Las máquinas accionadas por los aerogeneradores son de baja velocidad, lo cual hace a la necesidad de tener muchos pares de polos y gran diámetro del estátor, siendo el rotor construido mediante polos salientes.

#### Imanes Permanentes:

En cuanto a los imanes permanente hay que destacar que las maquinas síncronas construidas con imanes permanente tiene un volumen menor comparando con las demás.

Habitualmente los imanes se pegan sobre la superficie colocando con una apertura de  $120^\circ$ , siempre y cuando sea de un par de polos. Si fueran 2 pares de polos, la apertura entre ellos sería la mitad.



*Rotor de imanes permanentes de dos pares de polos*

Las maquinas de imanes permanentes ya tiene su autoexcitado, por lo que no tienen anillos rozantes, disminuyendo el mantenimiento de la maquina.

### Tipos de rotor:

- De polos lisos: El rotor es totalmente cilíndrico, lo que implica que la reluctancia, despreciando el efecto de las ranuras, permanece constante a lo largo del entrehierro. Este tipo de rotor se emplea en alternadores que deben de girar a grandes velocidades, como puede ser en centrales eléctricas que emplean como elemento motriz turbinas de gas o de vapor. Debido a los esfuerzos mecánicos asociados a las altas velocidades, el rotor debe construirse en una pieza cilíndrica de acero forjado de alta resistencia mecánica, donde se mecanizan las ranuras para alojar el bobinado del rotor.

La potencia de estos alternadores, de forma aproximada, es proporcional a su volumen ( $R^2l$ ). Debido a las fuerzas centrífugas asociadas a las altas velocidades el diámetro del rotor queda limitado (valor máximo entorno a 1,5m para 3000 r.p.m), por lo que tienden a ser máquinas muy alargadas. A este grupo pertenecen las máquinas eléctricas de mayor potencia, con potencias unitarias superiores a los 1600-2000MW.

- De polos salientes: En este caso el rotor está mecánicamente mejor adaptado para la construcción de máquinas de más de 2 pares de polos. Por ello, se utiliza en centrales hidráulicas donde las máquinas motrices son las turbinas Pelton, Francis o Kaplan, con velocidades de giro de entre 300 y 750 r.p.m, es decir, de 10 a 4 pares de polos respectivamente.

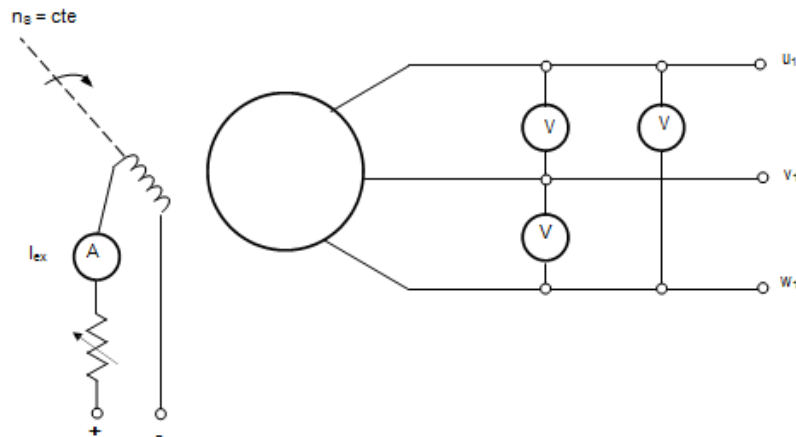
Otra aplicación reciente son las máquinas denominadas multipolo, "utilizadas mucho energía renovable como los aerogeneradores". Las turbinas eólicas tienen velocidades de giro muy bajas por lo que el número de pares de polos necesario puede superar los 30.

Las mayores potencias unitarias son inferiores a las encontradas en el caso de los lisos y se sitúan en torno a los 820MVA.

### Característica de vacío:

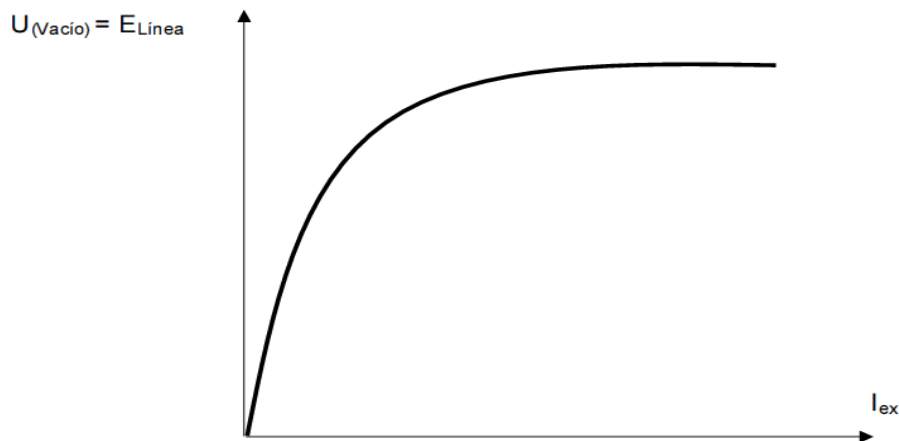
La característica de vacío de la máquina, es la relación de la tensión en sus bornes, con la corriente de excitación que se hace circular en la bobina del rotor manteniendo la **velocidad angular** del mismo **constante** y sin que circule corriente por las bobinas del estátor (No entrega potencia).

En este caso, esta tensión coincide con la fuerza electromotriz inducida por efectos del flujo magnético originado en el rotor. El circuito de ensayo es el mostrado en la siguiente figura:



Circuito para ensayo en vacío de un generador síncrono

Alimentando con una fuente de corriente continua la bobina del rotor, variando la intensidad de la misma y efectuando las lecturas de los voltímetros se obtiene la curva siguiente:



De la curva observamos que en la primera parte hay una relación lineal entre la corriente de excitación y la fuerza electromotriz, luego aparece un codo de saturación y por último una zona saturada en la cual para un incremento de la corriente de excitación, se logran pequeños incrementos de la tensión.

El análisis que efectuamos sobre la máquina lo hacemos dentro de la zona lineal a los efectos de simplificar los conceptos.

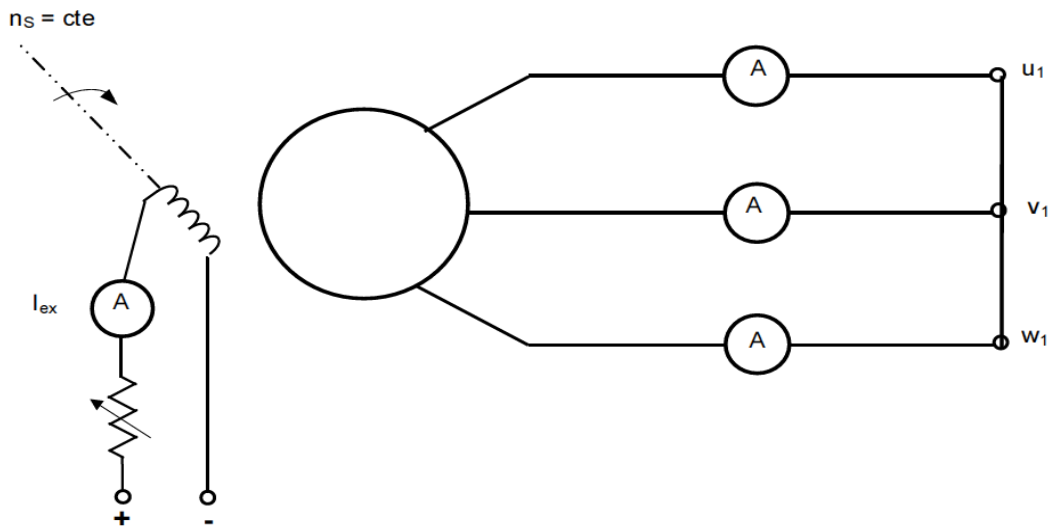
Esta curva se corresponde con la de imantación de la máquina (Para una determinada velocidad del rotor), ya que la tensión es función del flujo y la intensidad de campo magnético es proporcional a la corriente de excitación.

En las máquina de rotor de imanes permanentes, el valor de la excitación es fija, por lo que a cada velocidad le corresponde una tensión.

### Característica de cortocircuito:

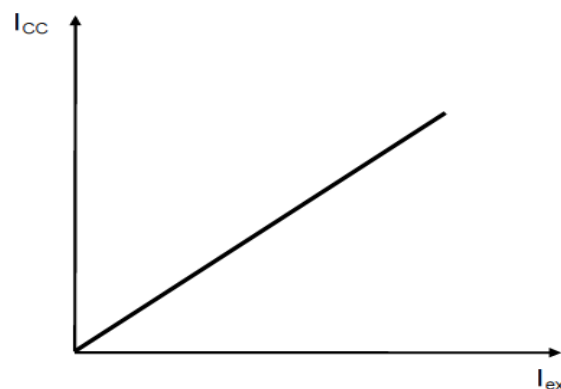
La característica de cortocircuito es la relación entre la corriente estatórica y la corriente de excitación con los bornes cortocircuitados.

Este ensayo se realiza cortocircuitando los bornes del generador, midiendo la corriente con amperímetros, y manteniendo la velocidad constante, se varía la corriente de excitación y se efectúan las lecturas de la corriente estatórica, utilizando el circuito de la siguiente figura:



*Circuito para ensayo en cortocircuito de un generador síncrono*

Dado que la reacción de armadura es netamente desmagnetizante, debido a que la propia reactancia sincrónica de la máquina actúa de única carga, la relación entre ambas corrientes es lineal, ya que el circuito magnético no se satura, según se observa en la siguiente figura.



*Curva de cortocircuito de un generador síncrono*

Dada la relación prácticamente lineal entre ambas corrientes, con determinar un punto de la misma, se la puede dibujar la una gráfica, trazando la recta al origen.

### Características de ensayo de vacío y cortocircuito para la máquina de excitación con imanes

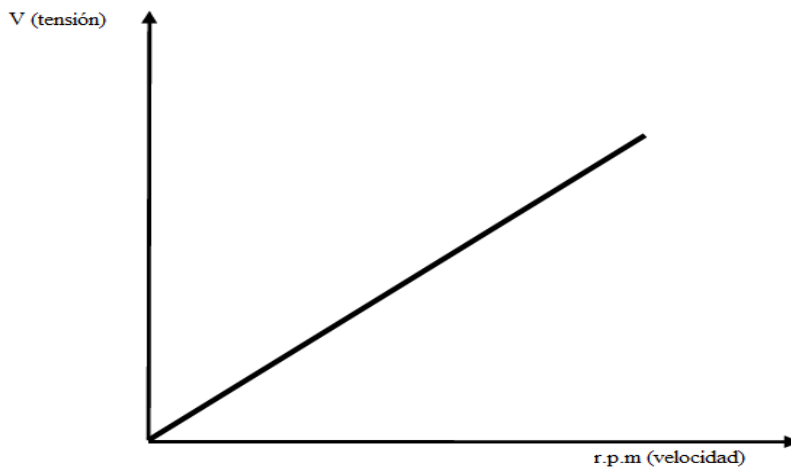


permanentes:

- Ensayo de vacío:

A la hora de realizar el ensayo de vacío se debe de acelerar el rotor hasta llegar a la velocidad nominal. Se hacen circular distintas corrientes por el rotor, se recogen los datos de tensión en el estátor y se obtiene la curva de vacío.

En el caso de las maquinas de imanes permanentes, como el valor de la excitación es fijo, se hace girar el rotor a distintas velocidades y se mide el valor de la tensión de vacío, obteniendo la curva de vacío, donde la tensión esta relacionada con la velocidad.



*Curva de vacío de un generador síncrono de imanes permanentes*

- Ensayo de cortocircuito:

En el ensayo de cortocircuito de una máquina síncrona de imanes permanentes, se bloquea el rotor y se aumenta la tensión en el estátor hasta llegar a la corriente nominal del mismo.

Con los datos de tensión e intensidad se calcula la impedancia interna de la maquina. Después, con la máquina parada, se inyecta una corriente continua por uno de los devanados y se obtiene el valor de la resistencia interna del devanado. Con los valores de la resistencia y la impedancia interna se de calcula el valor de la inductancia.

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Siendo:

- Z = Impedancia del devanado del estátor.
- R = Resistencia de devanado del estátor.
- X = Inductancia del devanado del estátor.

### **3.2.3.2 - Ventajas y desventajas de la maquina síncrona como generador:**

#### Ventajas:

- No existe deslizamiento en el rotor de velocidad.
- Es capaz de generar energía reactiva.
- En el caso de los motores con imanes, la relación de potencia volumen es la mejor de todas.
- A la hora de utilizar estas maquinas como generador son fáciles de controlar.
- En el caso de las maquinas con rotor de imanes permanentes, el mantenimiento es prácticamente nulo.

#### Desventajas:

- Las maquinas de rotor bobinado tienen un mantenimiento bastante grande debido a las escobillas y los anillos rozantes.
- En el caso de las maquinas de imanes permanentes no existe control de tensión de salida.

## **3.3 - Elección del motor:**

A la hora de construir un aerogenerador debemos de tener en cuenta muy bien la maquina que vamos a elegir, ya que ella va ser la que nos transformará la energía que queremos sacar. La energía que genere el aerogenerador la debemos de almacenar en baterías, para ello debemos de encontrar un motor cuyas tensiones de salida se acerquen al valor nominal de tensión de las baterías.

En el mercado podemos encontrar varios tipos de motores:

- Maquina de corriente continua:
  - Estátor bobinado.
  - Estátor de imanes permanentes.
- Maquina asíncrona:
  - Jaula de ardilla.
  - Rotor bobinado.
- Maquina síncrona:
  - Rotor bobinado.
  - Rotor de imanes permanentes.

Entre todas estas maquinas deberemos de analizar las ventajas y desventajas de cada una de ellas para escoger la que mejores características tenga. Las características más importantes a tener en cuenta son las siguientes:

- Valores de tensión adecuados
- Relación de volumen-potencia
- Robustez
- Relación precio-rendimiento

Teniendo en cuenta los factores anteriores, la máquina que más se acerca a esas características es la máquina síncrona de imanes permanentes.

Estas máquinas denominadas de imanes permanentes tienen una característica muy importante que anteriormente no se ha mencionado. En el caso del aerogenerador, es posible que debido a algún problema haya que parar el molino, con cortocircuitar el estátor de la máquina es suficiente. La tensión de salida es función de la velocidad, al cortocircuitar el estátor, se hace que la tensión sea prácticamente nula, por lo que el molino se para.

Esto solo se puede hacer en aerogeneradores con palas aerodinámicas, ya que al cortocircuitar, la potencia que se extrae de las palas es muy alta y estas salen del régimen aerodinámico, por lo que no hacen prácticamente par en el eje, con otros generadores más lentos, que tienen mucho par, no se puede emplear este sistema de parada porque el motor terminaría quemándose.

### Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga

Vviento(m/s)	rpm motor
0	0,00
0,5	13,64
1	27,28
1,5	40,93
2	54,57
2,5	68,21
3	81,85
3,5	95,49
4	109,13
4,5	122,78
5	136,42
5,5	150,06
6	163,70
6,5	177,34
7	190,99
7,5	204,63
8	218,27
8,5	231,91
9	245,55
9,5	259,20
10	272,84
10,5	286,48
11	300,12
11,5	313,76
12	327,40
12,5	341,05
13	354,69
13,5	368,33
14	381,97

*Relación entre velocidad  
de viento y rpm del  
aerogenerador*

Sabiendo que las palas del aerogenerador que se va a construir tienen un T.S.R de 6, es decir, la velocidad de las puntas de las palas tiene que ser 6 veces superior a la velocidad del viento para obtener el máximo rendimiento, tendremos la velocidad mínima y máxima de rotación del motor.

Como se puede observar en la tabla superior, el motor generará en un rango de velocidades de giro entre 54 y 286rpm, lo que supone una velocidad de rotación bastante baja.

La elección del motor es un proceso algo difícil ya que a esas velocidad el motor ya debería de dar una tensión suficiente como para poder cargar las baterías. Si la tensión es muy baja, la corriente que circulará por el motor será muy alta, aumentando las pérdidas, sin embargo, si las tensiones son muy altas, aunque las corrientes sean inferiores, la tensión podría perforar el aislamiento, rompiendo el generador.

El mercado de la venta de los motores síncronos de imanes permanentes es muy reducido, porque se utilizan en aplicaciones muy específicas. Se ha elegido un motor de ascensor de 6 pares de polos, ya que la construcción de estos motores se realizan en una empresa cercana y tienen bastantes modelos. La empresa se llama PERMAGSA y el modelo que se ha elegido es

el ge150-240-225

### **3.3.1 – características técnicas del motor ge150-240-225**

El ge150-240-225 es el motor que se ha elegido para poder desarrollar el siguiente proyecto, ya que cumplía con las mejores características para realizar el aerogenerador.

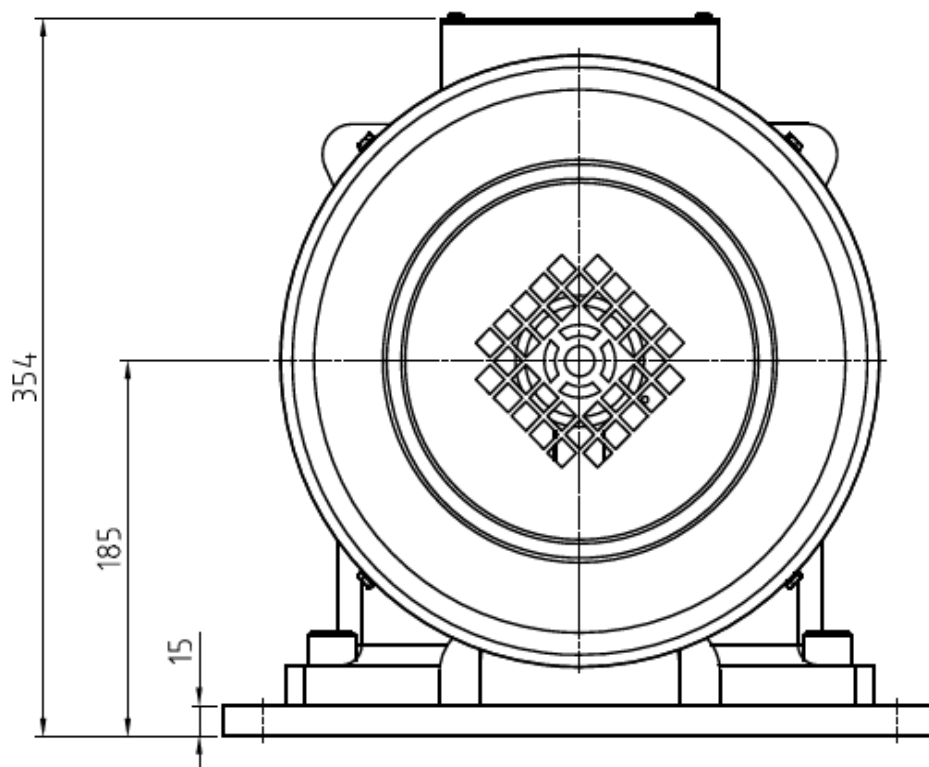
Se ha escogido este motor ha sido por las siguientes razones:

- Fácil adquisición.
- Potencia nominal en torno a 4kw
- Precio asequible
- Robustez
- Gran aguante de par del rotor. Lo que permite conectar las palas directamente al generador.

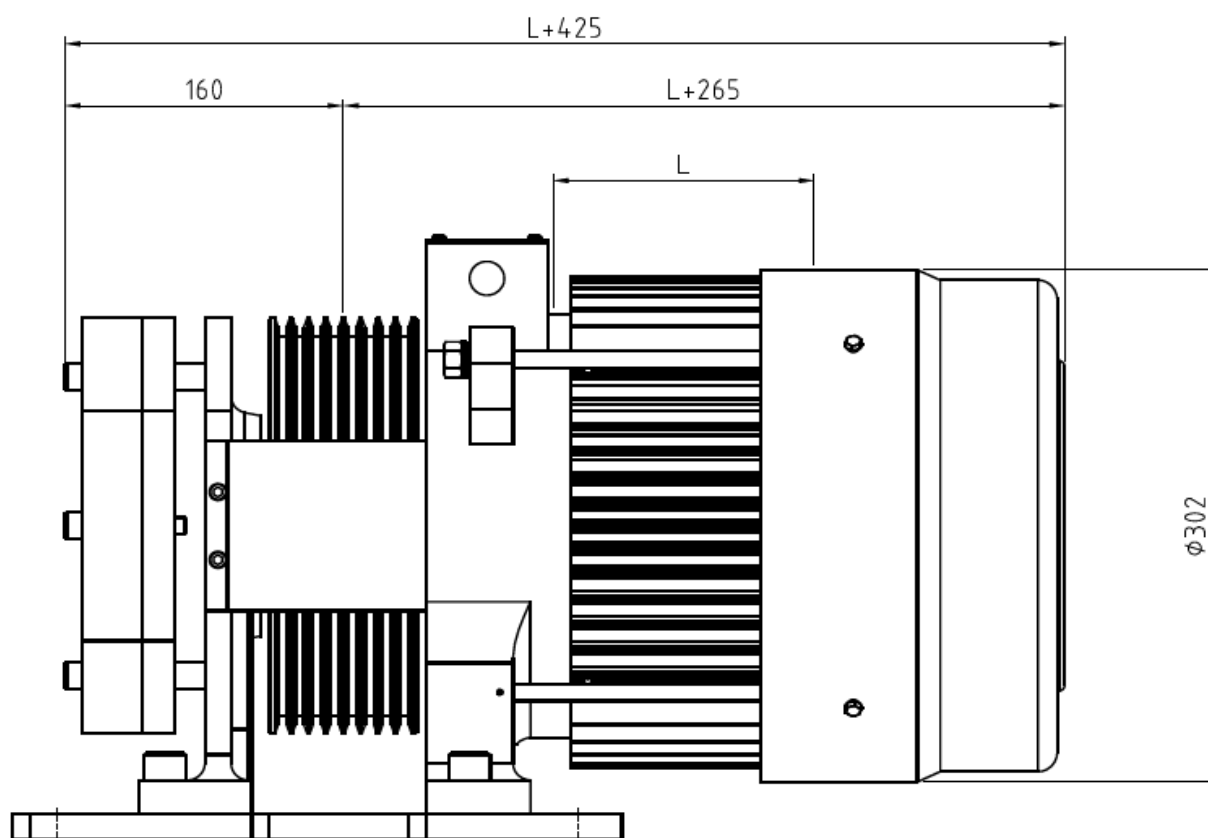
El motor, al ser para un ascensor, trae consigo una polea, un encoder y un freno. Para la construcción del aerogenerador se tiene que que eliminar toda carga innecesaria del eje, minimizando las pérdidas por rozamiento. Con esto se consigue que el par de arranque sea menor, por lo que el aerogenerador arrancará a menores velocidades de viento. Aunque los vientos suaves no proporcionen mucha potencia, es muy importante aprovecharlos, porque son muy habituales y si no se aprovechan bien, es mucha la energía que se desaprovecha.

A continuación presentaremos los planos del motor:





*Vista trasera del motor*



*Vista lateral del motor*

Datos eléctricos:

Corriente nominal (A)	10
Corriente máxima (A)	27,7
Voltaje (v)	340
Potencia nominal (kw)	4,3
Hercios (Hz)	15,9
Freno Vdc (V)	210
Polos	12

Hay que tener en cuenta que estas características son para el uso de la máquina como motor, en cambio en este caso trabajara como generador. Para el diseño del aerogenerador los datos mas importantes son lo siguientes:

- Numero de polos.
- Corriente nominal.
- Par motor.

El numero de polos determina la velocidad nominal del motor, cuantos mas polos tenga,

mayor será la tensión de salida para cada velocidad. La corriente nominal indica la potencia máxima que se puede extraer del motor para cada velocidad de giro. Para determinar las características internas del motor para usarlo como generador hay que realizar las pruebas de vacío y cortocircuito.

### 3.3.2 – Ensayos de vacío y cortocircuito

Para hacer el ensayo de vacío, hay que hacer girar el generador con una máquina motriz y medir los valores de la tensión a cada velocidad.

En el caso de este generador, se le ha hecho girar con un motor asíncrono de jaula de ardilla. Para conseguir distintos valores de velocidad se ha alimentado el motor con un autotransformador trifásico. Con un polímetro se ha medido la tensión de vacío para una fase, para medir la velocidad del generador se ha utilizado un polímetro, con el que se ha medido la frecuencia, y con esta se ha calculado el valor de velocidad, obteniendo así la característica tensión-velocidad del motor, representada en la siguiente gráfica:



Como se puede observar estas tensiones son de fase. Esto significa que las tensiones estrella serán raíz de tres veces superiores.

Para realizar el ensayo de cortocircuito se bloquea el rotor. De esta forma se pueden analizar las características del devanado del estátor. Para ello hay que conectar una fase a una fuente de tensión alterna de valor variable, que se consigue con un autotransformador y elevar la tensión hasta que circule la corriente nominal por el estátor. De esta forma, midiendo la tensión y la corriente con dos multímetros se calcula la impedancia. Después se mide el valor de la resistencia de cada devanado, para esto se utiliza una fuente de corriente continua y se miden la tensión y la corriente para calcular la resistencia. Con el valor de la impedancia y la resistencia se calcula el valor de la inductancia. En este caso, no se ha hecho esta prueba, ya que el valor de las tensiones en vacío es demasiado alta y se debe adoptar primero una solución a este problema.

### 3.3.2.1 - Inconvenientes del motor como generador:

Los valores de la tensión del generador para las velocidades a las que trabaja el aerogenerador son muy altas, ya que los valores de tensión rectificadora que aparecen en el convertidor electrónico llegan hasta los 1000V, que es una tensión peligrosa y dificulta la conversión electrónica, ya que el valor de la inductancia necesaria sería muy grande.

Viento(m/s)	rpm motor	Pteor	Motor sin modificar			
			V estrella	Vest rect	Vtriangulo	Vtri rect
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	13,64	0,48	35,44	47,86	20,46	27,63
1	27,28	3,87	70,89	95,73	40,93	55,27
1,5	40,93	13,05	106,33	143,59	61,39	82,90
2	54,57	30,92	141,77	191,46	81,85	110,54
2,5	68,21	60,40	177,21	239,32	102,31	138,17
3	81,85	104,37	212,66	287,19	122,78	165,81
3,5	95,49	165,73	248,10	335,05	143,24	193,44
4	109,13	247,38	283,54	382,91	163,70	221,08
4,5	122,78	352,23	318,98	430,78	184,17	248,71
5	136,42	483,17	354,43	478,64	204,63	276,34
5,5	150,06	643,10	389,87	526,51	225,09	303,98
6	163,70	834,92	425,31	574,37	245,55	331,61
6,5	177,34	1061,53	460,75	622,24	266,02	359,25
7	190,99	1325,83	496,20	670,10	286,48	386,88
7,5	204,63	1630,71	531,64	717,96	306,94	414,52
8	218,27	1979,08	567,08	765,83	327,40	442,15
8,5	231,91	2373,83	602,52	813,69	347,87	469,79
9	245,55	2817,87	637,97	861,56	368,33	497,42
9,5	259,20	3314,08	673,41	909,42	388,79	525,05
10	272,84	3865,38	708,85	957,29	409,26	552,69
10,5	286,48	4474,67	744,29	1005,15	429,72	580,32
11	300,12	5144,83	779,74	1053,01	450,18	607,96
11,5	313,76	5878,77	815,18	1100,88	470,64	635,59
12	327,40	6679,38	850,62	1148,74	491,11	663,23
12,5	341,05	7549,58	886,06	1196,61	511,57	690,86
13	354,69	8492,25	921,51	1244,47	532,03	718,50
13,5	368,33	9510,29	956,95	1292,34	552,50	746,13
14	381,97	10606,61	992,39	1340,20	572,96	773,76

En la imagen anterior se puede ver el valor la tensión que produce el generador en vacío sin realizar ningún cambio constructivo en las dos configuraciones de conexión posibles: estrella y triángulo.

### 3.3.3 – Solución adoptada para disminuir la tensión

El valor de la tensión de salida del generador es demasiado grande pero existen varias soluciones para disminuir esa tensión:

- Combinar las fases del motor en triángulo. Con este método se puede disminuir la tensión hasta raíz de tres veces. Los valores de la tensión siguen siendo altos, por lo que habría que adoptar alguna medida más. Además la conexión en triángulo puede disminuir el rendimiento debido a que los armónicos pueden cerrarse por el

## Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga

motor, calentándolo innecesariamente y disminuyendo el rendimiento.

- Colocar un Transformador a la salida del motor, consiguiendo así una tensión menor, aunque el rendimiento del sistema disminuye debido a las pérdidas producidas en el transformador.
- Colocar una reductora de velocidad entre las palas del aerogenerador y el generador. Así se consigue que el motor gire más lento y por lo tanto la tensión de salida sea más baja. Los mayores inconvenientes son que los engranajes necesitan un mantenimiento, el rendimiento disminuye debido al rozamiento y supone un coste económico.
- Si se analiza la estructura constructiva del motor, se puede ver que hay una solución barata y eficaz. La máquina consta de seis pares de polos, lo que significa que cada fase está compuesta por seis bobinas idénticas, en este motor las seis bobinas están conectadas en serie, por lo que la tensión de las seis se suma. Si las bobinas se conectan en otras configuraciones en serie o paralelo, los valores de tensión a la salida disminuyen. En la próxima tabla se muestran los valores de tensión estimados para distintas conexiones del bobinado:

Conexión 3/3				2/2/2				Todas paralelo			
V estrella	Vest rect	Vtriangulo	Vtri rect	V estrella	Vest rect	Vtriangulo	Vtri rect	V estrella	Vest rect	Vtriangulo	Vtri rect
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,72	23,93	10,23	13,82	11,81	15,95	6,82	9,21	5,91	7,98	3,41	4,61
35,44	47,86	20,46	27,63	23,63	31,91	13,64	18,42	11,81	15,95	6,82	9,21
53,16	71,80	30,69	41,45	35,44	47,86	20,46	27,63	17,72	23,93	10,23	13,82
70,89	95,73	40,93	55,27	47,26	63,82	27,28	36,85	23,63	31,91	13,64	18,42
88,61	119,66	51,16	69,09	59,07	79,77	34,10	46,06	29,54	39,89	17,05	23,03
106,33	143,59	61,39	82,90	70,89	95,73	40,93	55,27	35,44	47,86	20,46	27,63
124,05	167,53	71,62	96,72	82,70	111,68	47,75	64,48	41,35	55,84	23,87	32,24
141,77	191,46	81,85	110,54	94,51	127,64	54,57	73,69	47,26	63,82	27,28	36,85
159,49	215,39	92,08	124,36	106,33	143,59	61,39	82,90	53,16	71,80	30,69	41,45
177,21	239,32	102,31	138,17	118,14	159,55	68,21	92,11	59,07	79,77	34,10	46,06
194,93	263,25	112,55	151,99	129,96	175,50	75,03	101,33	64,98	87,75	37,52	50,66
212,66	287,19	122,78	165,81	141,77	191,46	81,85	110,54	70,89	95,73	40,93	55,27
230,38	311,12	133,01	179,62	153,58	207,41	88,67	119,75	76,79	103,71	44,34	59,87
248,10	335,05	143,24	193,44	165,40	223,37	95,49	128,96	82,70	111,68	47,75	64,48
265,82	358,98	153,47	207,26	177,21	239,32	102,31	138,17	88,61	119,66	51,16	69,09
283,54	382,91	163,70	221,08	189,03	255,28	109,13	147,38	94,51	127,64	54,57	73,69
301,26	406,85	173,93	234,89	200,84	271,23	115,96	156,60	100,42	135,62	57,98	78,30
318,98	430,78	184,17	248,71	212,66	287,19	122,78	165,81	106,33	143,59	61,39	82,90
336,70	454,71	194,40	262,53	224,47	303,14	129,60	175,02	112,23	151,57	64,80	87,51
354,43	478,64	204,63	276,34	236,28	319,10	136,42	184,23	118,14	159,55	68,21	92,11
372,15	502,58	214,86	290,16	248,10	335,05	143,24	193,44	124,05	167,53	71,62	96,72
389,87	526,51	225,09	303,98	259,91	351,00	150,06	202,65	129,96	175,50	75,03	101,33
407,59	550,44	235,32	317,80	271,73	366,96	156,88	211,86	135,86	183,48	78,44	105,93
425,31	574,37	245,55	331,61	283,54	382,91	163,70	221,08	141,77	191,46	81,85	110,54
443,03	598,30	255,78	345,43	295,35	398,87	170,52	230,29	147,68	199,43	85,26	115,14
460,75	622,24	266,02	359,25	307,17	414,82	177,34	239,50	153,58	207,41	88,67	119,75
478,47	646,17	276,25	373,07	318,98	430,78	184,17	248,71	159,49	215,39	92,08	124,36
496,20	670,10	286,48	386,88	330,80	446,73	190,99	257,92	165,40	223,37	95,49	128,96

Se ha optado por cambiar la configuración de los bobinados porque es una solución que no disminuye el rendimiento del sistema y no supone un gasto económico.

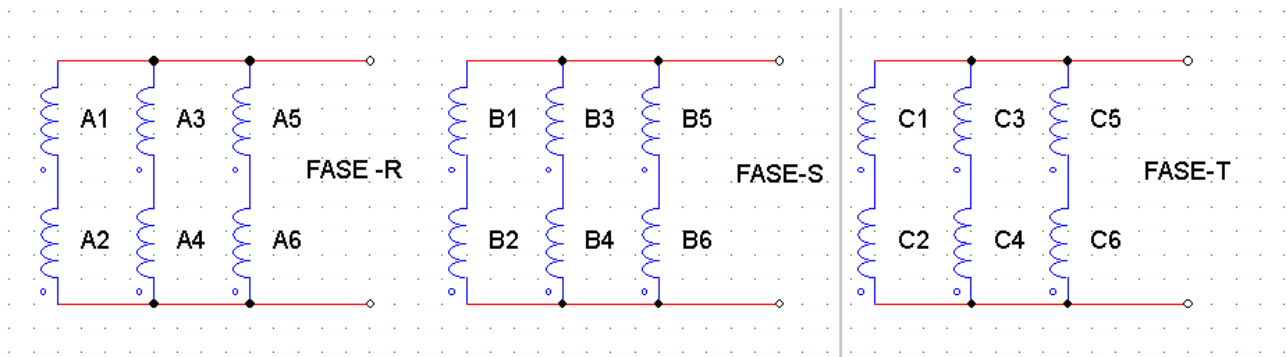
Antes de escoger una configuración de bobinado u otra, hay que tener en cuenta el tipo de conexión. La conexión en estrella es más adecuada que la de triángulo por dos motivos, el



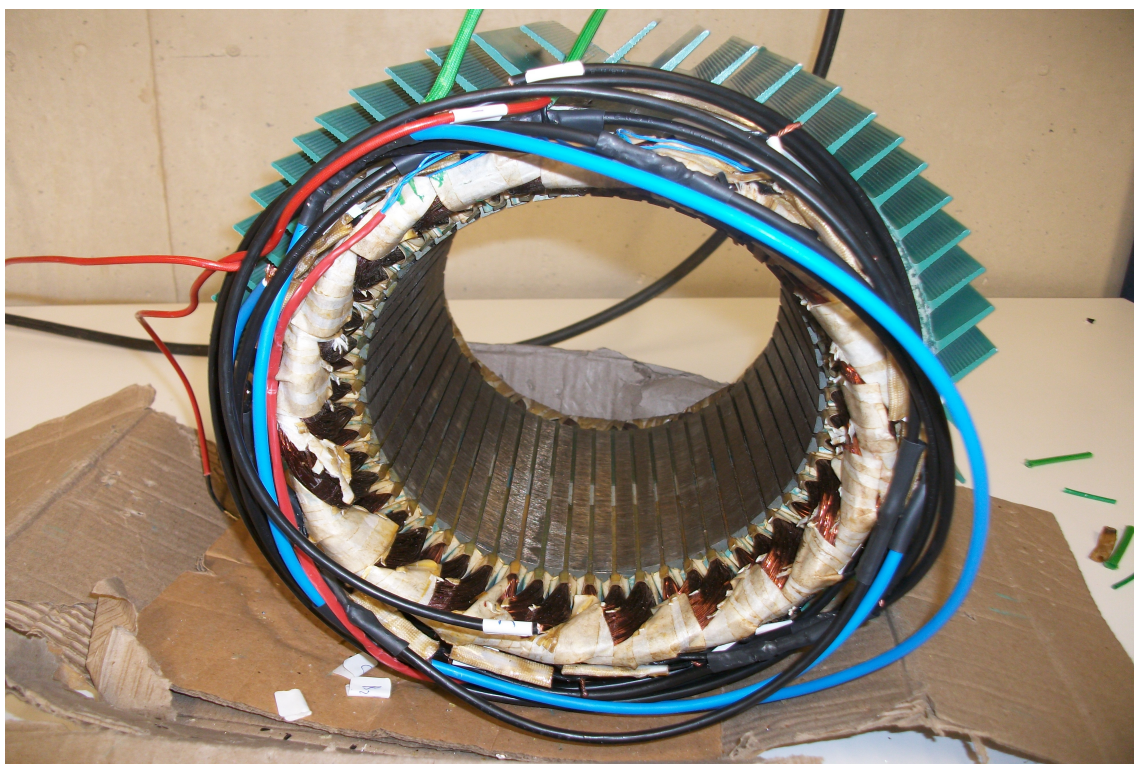
primero es que existe conexión de neutro, por lo que se puede conectar este a la puesta de tierra del molino. El segundo motivo es que en el caso de aparecer armónicos en el generador, si la conexión es en triángulo, estos pueden cerrarse por el bobinado, disminuyendo el rendimiento y calentando el generador.

Para escoger la configuración de bobinado más adecuada, hay que fijarse en el valor de la tensión a la velocidad de viento a la que se empieza a generar, y el valor para la tensión a potencia máxima. La tensión mínima tiene que ser superior a la tensión de las baterías (48V) y la máxima no debe ser muy alta, porque cuanto más alta sea, el valor de la inductancia del convertidor tiene que ser mayor, aumentando el coste de la electrónica.

La configuración más adecuada es la que aparece subrayada en amarillo en la tabla. Las bobinas se colocan en serie por parejas, formando tres ramas paralelas, compuestas de dos bobinas en serie, como se puede ver en la siguiente imagen:



Para cambiar la configuración del bobinado, se ha desmontado el motor entero. Una vez habiendo desmontado el motor, se han buscado todas las conexiones de los bobinados, y una vez comprobado que las conexiones estaban bien localizadas, se cambiaron algunas de ellas para conseguir la nueva configuración. El valor de la tensión en este caso es tres veces inferior y la corriente de salida será tres veces superior, ya que se suma la corriente de las tres ramas. El cable de salida debe soportar ahora una corriente tres veces mayor, el cable que trae consigo el motor es de  $1,5\text{mm}^2$  y se ha sustituido por uno de  $6\text{mm}^2$  para que soporte la corriente sin quemarse el cable.



En la imagen anterior se puede observar los cables de  $6\text{mm}^2$  (de color azul y negro), soldados con las bobinas, formando todo el conjunto el generador. Los cables rojos que se aprecian en la parte izquierda de la imagen, son los cables que traía consigo el motor.

Después de realizar el cambio de las bobinas, se ha vuelto a montar el motor y se han repetido los ensayos de vacío, En la tabla siguiente se pueden apreciar los resultados:

## Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga

Estator cambiado						
Vviento	Velocidad rpm	Pteor	Vlinea	V DC	Imotor	Idc
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	13,64	0,48	16,67	22,52	0,02	0,01
1,00	27,28	3,87	33,35	45,03	0,07	0,08
1,50	40,93	13,05	50,02	67,55	0,15	0,26
2,00	54,57	30,92	66,69	90,06	0,27	0,62
2,50	68,21	60,40	83,36	112,58	0,42	1,21
3,00	81,85	104,37	100,04	135,10	0,60	2,09
3,50	95,49	165,73	116,71	157,61	0,82	3,31
4,00	109,13	247,38	133,38	180,13	1,07	4,95
4,50	122,78	352,23	150,05	202,64	1,36	7,04
5,00	136,42	483,17	166,73	225,16	1,67	9,66
5,50	150,06	643,10	183,40	247,67	2,02	12,86
6,00	163,70	834,92	200,07	270,19	2,41	16,70
6,50	177,34	1061,53	216,74	292,71	2,83	21,23
7,00	190,99	1325,83	233,42	315,22	3,28	26,52
7,50	204,63	1630,71	250,09	337,74	3,76	32,61
8,00	218,27	1979,08	266,76	360,25	4,28	39,58
8,50	231,91	2373,83	283,43	382,77	4,84	47,48
9,00	245,55	2817,87	300,11	405,29	5,42	56,36
9,50	259,20	3314,08	316,78	427,80	6,04	66,28
10,00	272,84	3865,38	333,45	450,32	6,69	77,31
10,50	286,48	4474,67	350,12	472,83	7,38	89,49
11,00	300,12	5144,83	366,80	495,35	8,10	102,90
11,50	313,76	5878,77	383,47	517,87	8,85	117,58
12,00	327,40	6679,38	400,14	540,38	9,64	133,59
12,50	341,05	7549,58	416,81	562,90	10,46	150,99
13,00	354,69	8492,25	433,49	585,41	11,31	169,84
13,50	368,33	9510,29	450,16	607,93	12,20	190,21
14,00	381,97	10606,61	466,83	630,44	13,12	212,13

El valor de la tensión de vacío de la máquina es algo superior a lo estimado antes de hacer el cambio de bobinado, pero sus valores se encuentran en un rango admisible. La corriente que pasa por el motor llega casi hasta los trece amperios, pero al estar los bobinados en paralelo, la corriente nominal de generador es tres veces superior (30A) y no hay peligro de que se queme el motor por un sobrecalentamiento.

Con las características de tensión y corriente del generador, ya se puede diseñar el sistema electrónico que cargará las baterías y controlará el molino.

## **4º CAPÍTULO – CONVERTIDOR REGULADOR DE CARGA**

## **4.1 - Estructura del convertidor**

### **4.1 - Introducción**

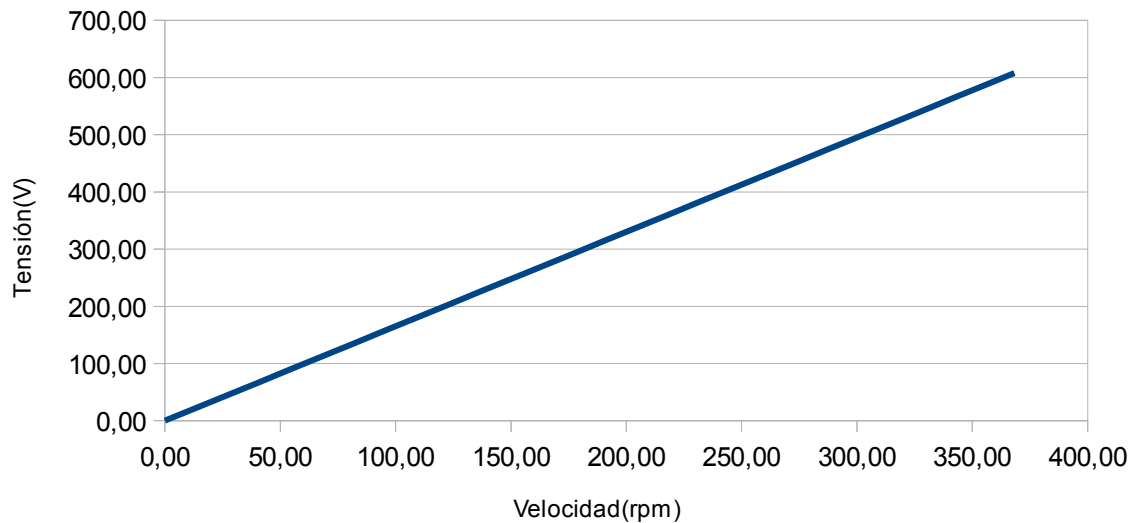
Para almacenar la energía generada por el aerogenerador hace falta un convertidor para adecuar la tensión del generador a la tensión de las baterías. La tensión generada es alterna trifásica, y la tensión de las baterías es continua, por lo que es necesario un convertidor. El convertidor puede construirse únicamente con un puente rectificador de diodos, que rectifica la tensión. El valor de esta tensión rectificada es variable, según la velocidad del aerogenerador, solo con un rectificador de diodos basta para cargar las baterías, pero estas imponen su tensión, por lo que también imponen una velocidad de rotación al aerogenerador, disminuyendo notablemente su rendimiento.

Para poder obtener un mejor rendimiento, la velocidad del aerogenerador tiene que ser proporcional a la del viento, ya que la velocidad en la punta de las palas tiene que ser seis veces mayor que la del viento para obtener el rendimiento óptimo. Para conseguir esto hay que utilizar un convertidor de corriente continua, consiguiendo así una velocidad variable en el aerogenerador. Como las baterías no imponen la velocidad de giro de las palas, los esfuerzos que sufren las baterías son menores, aumentando su vida útil, el aerogenerador también sufrirá menos, ya que ante las ráfagas de viento acelerará su velocidad, por lo que los esfuerzos mecánicos que sufre en las ráfagas son menores.

El aerogenerador producirá energía en un rango de velocidades comprendidas entre 50 y 300rpm. El valor de la tensión de las baterías es de 48V y los valores de la tensión del generador, una vez rectificadas, son siempre mayores que las de las baterías, por lo que el convertidor siempre tendrá que reducir la tensión. El tipo de convertidor que se utilizará será un reductor (Buck). En la siguiente imagen se puede ver el valor de la tensión rectificada a distintas velocidades del generador.



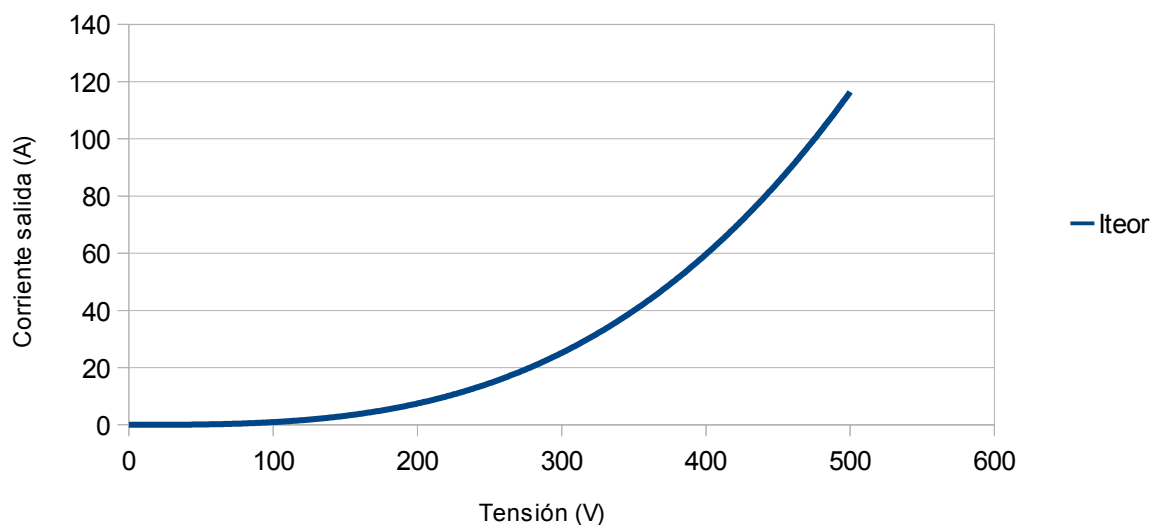
### Tensión rectificada



### Valor de la tensión rectificada en función de la velocidad

La potencia máxima que entregará el aerogenerador es de 4KW, por lo que la corriente a la salida será de 80A como máximo. Para el rizado de corriente se ha escogido un valor máximo admisible del 10%. La frecuencia de conmutación será de 10KHz, se ha escogido este valor debido a la corriente del convertidor, lo ideal sería conmutar a 20Khz, pero las pérdidas a esta frecuencia serían demasiado grandes. Los fabricantes de convertidores no suelen utilizar frecuencias tan altas para estos valores de corriente. En la siguiente imagen se puede ver el valor teórico de corriente en las baterías en función de la tensión de entrada.

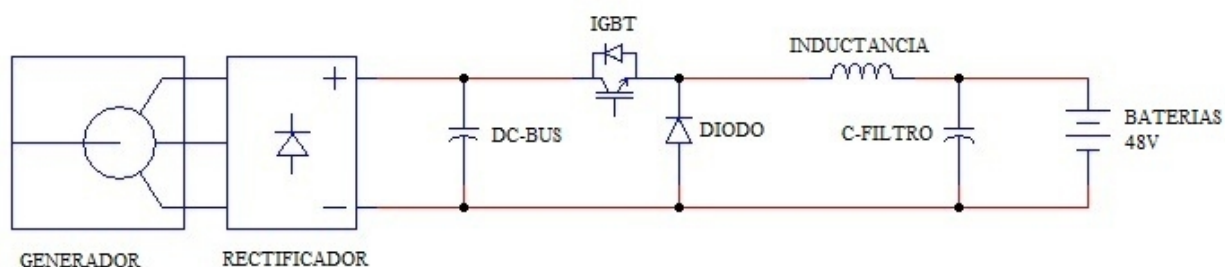
### Corriente teórica en función de la tensión rectificada



### Corriente teórica en función de la velocidad

Un convertidor de potencia está constituido por dispositivos semiconductores que hacen las veces de interruptores de potencia. Los convertidores se pueden clasificar en controlados y no controlados según el tipo de semiconductores que tienen. En este caso se centrará la atención en los convertidores controlados, ya que el convertidor que se ocupa en este proyecto es controlado. Se dice que un convertidor es controlado cuando los interruptores que lo constituyen pueden ser controlados en su encendido (Tiristores), o en su encendido y apagado (Transistores BJT, MOSFET, IGBT).

El bloque de conmutación del convertidor reductor está formado por un IGBT y un diodo. El IGBT es controlado por el driver que le manda las señales de encendido y apagado. Antes del bloque de conmutación se encuentra el rectificador y el bus de continua, que sirve para rectificar y estabilizar la tensión. A la salida del bloque hay un filtro constituido por una inductancia y un condensador, que hacen que la tensión y la corriente a la salida sean continuas.



*Esquema global del sistema*

En la imagen anterior se puede observar un esquema global del convertidor de potencia que se ha construido para el aerogenerador.

## 4.2 – Componentes del convertidor

En los siguientes apartados se describen uno por uno los distintos componentes del convertidor electrónico.

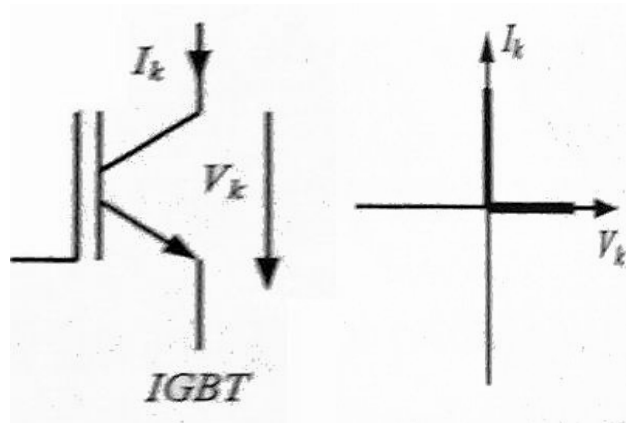
### 4.2.1 - EL IGBT

Un IGBT (De las siglas en inglés, Isolated Gate Bipolar Transistor) es un híbrido del transistor efecto de campo MOSFET y del transistor de unión bipolar BJT, y aprovecha las ventajas de ambos: control por tensión para el encendido y apagado (MOSFET) y valores de tensión y corriente, en corte y conducción respectivamente, elevados (BJT y MOSFET).

Este semiconductor está formado por 3 terminales, el colector (C), la puerta (G), y el emisor (E). Sus prestaciones se establecen a partir de 3 características:

1.- Característica de controlabilidad: Como se mencionó anteriormente presenta control de encendido y apagado.

2.- Característica estática: Fija la reversibilidad en tensión y/o corriente del semiconductor, así como la tensión máxima que puede soportar en corte y la corriente máxima que puede soportar en conducción. En el caso de un IGBT, para una corriente de colector,  $I_K$ , y tensión colector emisor,  $V_K$  positivas según las siguientes figuras.



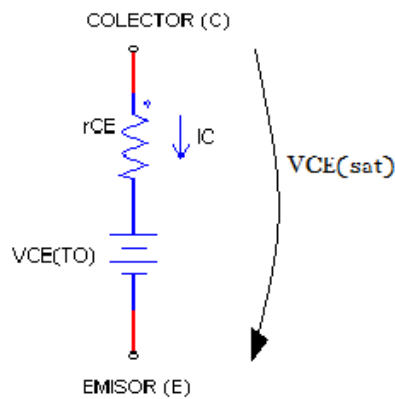
*Corriente y tensión positivas de un IGBT*

*Característica estática de un IGBT*

Según la figura anterior, el IGBT en corte solo soporta  $V_{CE} > 0$  y en conducción la corriente va del colector al emisor en cuyo caso  $I_C > 0$ , y fácilmente se puede deducir que no es reversible ni en tensión ni en corriente.

El IGBT conduce o está en corte según la  $V_{GE}$ , y en ambos casos la  $V_{CE} > 0$ :

- Entra en conducción si  $V_{GE} > V_{GE(th)}$  (tensión umbral)  $\approx 5$  ó  $6$  V. Para garantizar la saturación habitualmente  $V_{GE} = 15$  V. En este caso el IGBT se comporta como una fuente de tensión,  $V_{TO}$ , con una resistencia en serie,  $r_{CE}$  como se puede ver en la siguiente imagen.



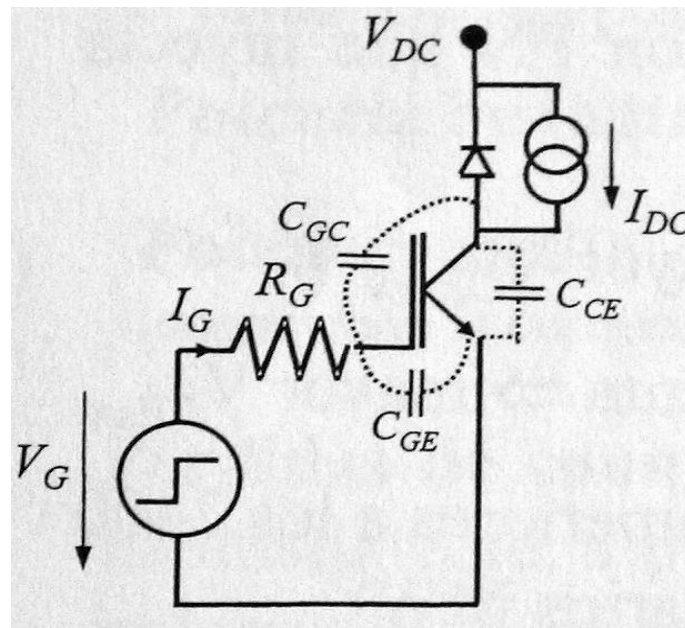
*Circuito equivalente de un IGBT*

La tensión colector emisor en saturación,  $V_{ce}(sat)$ , aumenta con la temperatura. Esta característica será tenida en cuenta a la hora de calcular las pérdidas del IGBT.

- Entra en corte si  $V_{GE} < V_{GE}(th)$ , habitualmente el corte se asegura si  $V_{GE} = -5V$ . En esta situación el IGBT sigue teniendo una  $V_{CE} > 0$ , aunque mucho mayor que en conducción, y una corriente de colector prácticamente nula.

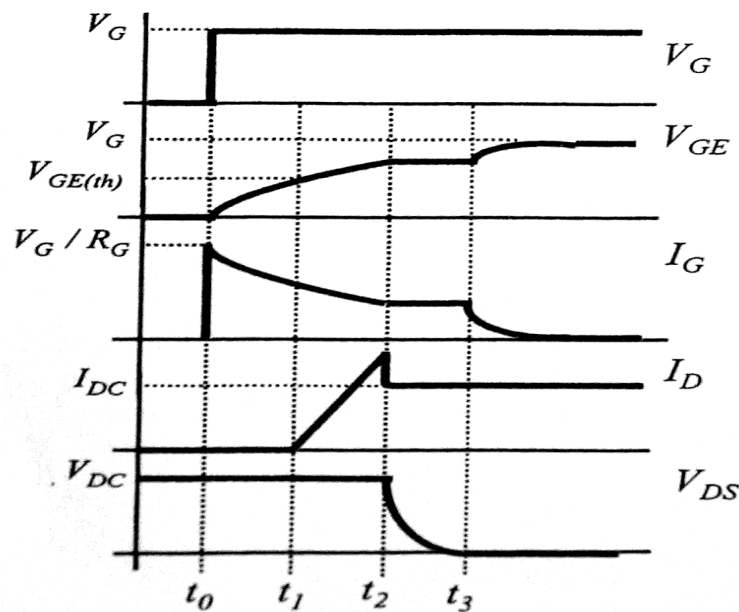
3.- Característica dinámica: Determina la trayectoria seguida del paso del estado de conducción al de corte y viceversa. Es decir el camino seguido en las conmutaciones, del encendido al apagado y viceversa.

A continuación se explican las fases importantes del encendido y apagado de un IGBT, según el circuito de la siguiente figura. Se destaca el hecho de que en las conmutaciones es necesario cargar y descargar las capacidades parásitas del IGBT.



Circuito de conmutación de un IGBT

- ENCENDIDO.- Su característica de conmutación se muestra en la siguiente figura.



Características del encendido de un IGBT

1.- Desde que  $V_G$  pasa a nivel alto (suponemos +15V) hasta que la  $V_{GE} = V_{GE(th)}$  (tensión umbral) se tiene el tiempo de retraso de encendido,  $t_{on}$ . Durante este tiempo el IGBT permanece apagado y su duración depende de la capacidad parásita de entrada  $C_{ies} = C_{GC} + C_{GE}$ , de la



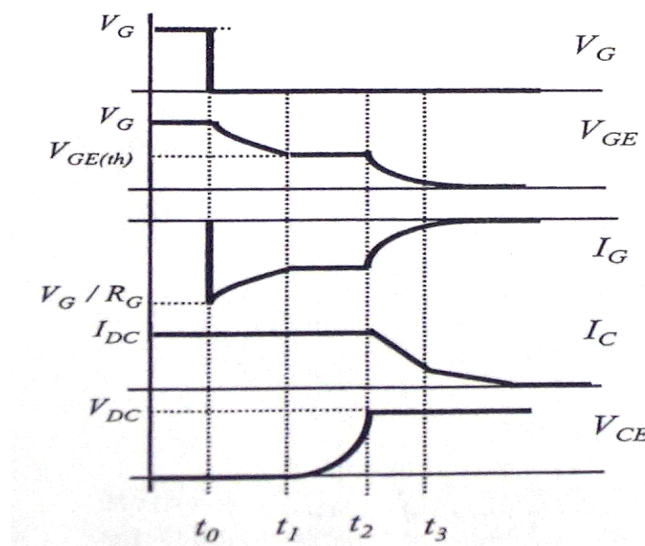
$R_G$  (resistencia de puerta) y de la  $V_G$ .

2.- Desde que se alcanza la tensión umbral, la corriente de colector,  $I_C$ , empieza a subir. Se conoce como tiempo de subida,  $t_r$ , al intervalo en el que  $I_C$  tarda en pasar del 10% al 90% de su valor final. Durante este intervalo la  $V_{GE}$  sigue aumentando.

3.- Se presenta el Efecto Miller, en el que la  $I_G$  es absorbida por la descarga de la capacidad  $C_{GC}$  por lo que la  $V_{GE}$  permanece prácticamente constante. Además con el diodo en anti serie bloqueado la tensión,  $V_{CE}$ , empieza a disminuir.

4.- Una vez terminada la conmutación del IGBT la  $V_{GE}$  sigue aumentando hasta alcanzar el valor de  $V_G$ . El valor de la capacidad de entrada  $C_{ies}$  varía con la  $V_{CE}$  siendo mayor cuanto menor es dicha tensión. Durante el encendido conviven valores de tensión y corriente bastante grandes lo que provoca grandes pérdidas en este intervalo.

- APAGADO.- Su característica se muestra en la siguiente figura.



Característica del apagado de un IGBT

1.- Desde que  $V_G$  pasa a nivel bajo (suponemos +15V) hasta que la  $V_{GE}=V_{GE(th)}$  se tiene el tiempo de retraso de apagado,  $t_{doff}$ . Durante este tiempo el IGBT permanece encendido y su duración depende de la capacidad parásita de entrada  $C_{ies} = // (C_{GC} \text{ y } C_{GE})$  y de la  $R_G$ .

Generalmente se cumple:  $t_{doff} \gg t_{don}$  debido a que  $C_{ies}$  es mayor cuando el IGBT está encendido  $\rightarrow V_{CE}$  es pequeña (como se dijo antes  $C_{ies}$  y  $V_{CE}$  son inversamente proporcionales).

Esta es una característica importante para determinar cómo será el disparo enviado por el driver a su IGBT.

2.- Una vez se alcanza la tensión umbral,  $V_{GE(th)}$ , se presenta el Efecto Miller en el que la  $I_G$  es absorbida por la carga de la capacidad  $C_{GC}$  lo que implica que  $V_{GE}$  permanezca constante y  $V_{CE}$  aumente hasta alcanzar el valor de la tensión de bloqueo,  $V_{DC}$ .

3.- La corriente de colector,  $I_C$ , empieza a disminuir. Se da el tiempo de bajada,  $t_f$ , en el que  $I_{DC}$  tarda en pasar del 90% al 10%. Durante este intervalo la  $V_{CE}$  de corte se suma a las caídas de tensión en las inductancias parásitas de los cables, lo que implica una sobre tensión en el IGBT. Además se produce una corriente de cola debido al apagado más lento del BJT interno lo cual aumenta las pérdidas en el apagado.

Igual que en el encendido conviven valores de tensión y corriente bastante grandes lo que provoca grandes pérdidas en este intervalo.

La información de las capacidades parásitas las da el fabricante a través de:

Capacidad de entrada:  $C_{ies} = C_{GE} + C_{GC}$

Capacidad de salida:  $C_{oes} = C_{CE} + C_{GC}$

Capacidad de Miller:  $C_{res} = C_{GC}$

- PERDIDAS EN EL IGBT:

Son el resultado de:

De las pérdidas estáticas:

- Conducción:

Instantaneas  $> P_{cond} = V_{CEsat} \cdot I_c$

Valor medio  $> P_{cond} = \frac{1}{T} \cdot \int_{(p)}^{(t)} p_{cond}(t) dt$

- Corte: se pueden considerar prácticamente despreciables.

De las pérdidas por conmutación:

- $E_{on}$ , energía disipada durante un encendido.
- $E_{off}$ , energía disipada durante un apagado.
- $E_{on}$  y  $E_{off}=f(R_G, I_C, V_{DC})$  siendo  $V_{DC}$  la tensión de bloqueo.
- $F_{con}$ , es la frecuencia de conmutación.

Finalmente, se puede decir que el valor de todas las pérdidas de un IGBT aumentan con la frecuencia de conmutación. Como se verá más adelante, la frecuencia de trabajo es elevada lo que implica el uso de un disipador de calor que evita el calentamiento del IGBT y su posterior destrucción.

- Resumen: Finalmente, de la descripción de un IGBT, tanto en su estructura como en su funcionamiento se puede destacar:
  1. Presenta 3 terminales: colector, puerta y emisor.
  2. Es un semiconductor con control de encendido y de apagado.
  3. Tanto en corte como en conducción presenta  $V_{CE}>0$ . Para encenderlo hace falta  $V_{GE}>0$ , generalmente 15V. Para apagarlo hace falta  $V_{GE}\leq 0$ , generalmente -5V.
  4. No es reversible ni en tensión ni en corriente.
  5. Para las conmutaciones, es importante dimensionar de forma precisa la resistencia de puerta,  $R_G$  que determina el retraso en el encendido y en el apagado.
  6. En el IGBT se tienen pérdidas estáticas: por conducción y corte ( $\approx 0$ ); y pérdidas por conmutación: por el encendido y por el apagado.
  7. Las pérdidas del IGBT aumentan con la frecuencia de conmutación.

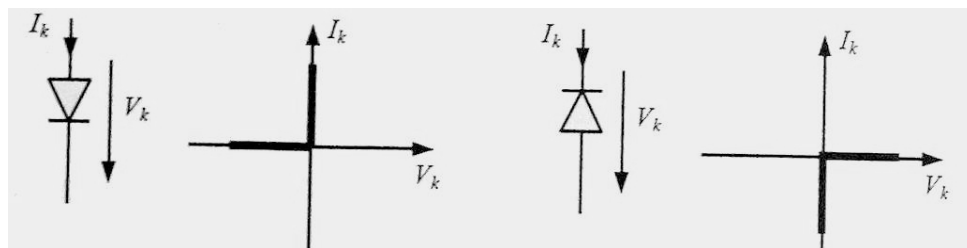
8. Será necesario utilizar un disipador de calor para evacuar dichas pérdidas.

#### 4.2.2 - EL DIODO

Es el interruptor semiconductor más sencillo que existe. Está formado por dos terminales, el ánodo (A), y el cátodo (K) como se observa en la figura que se muestra más adelante.

Al igual que el IGBT, se define con sus 3 características:

- 1.- Característica de controlabilidad: El diodo no es un dispositivo controlado y conduce o está en corte según las condiciones externas del sistema.
- 2.- Característica estática: Según la figura siguiente figura, un diodo conduce si la corriente va de ánodo a cátodo y entra en corte si dicha corriente intenta ir en sentido contrario.

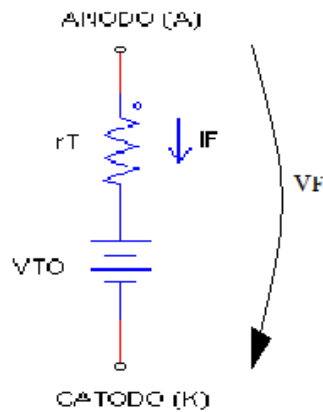


Característica estática del diodo

De acuerdo con la figura, el diodo no es reversible ni en tensión ni en corriente y cumple lo siguiente:

- En conducción:  $I_{AK} > 0$  y  $V_{AK} \approx 0V$  ( $0.8V \div 2V$ ). En este caso se dice que el diodo está polarizado en directa.
- En corte:  $V_{AK} < 0$  y  $I_{AK} = 0$ . Se dice que el diodo está polarizado en inversa.

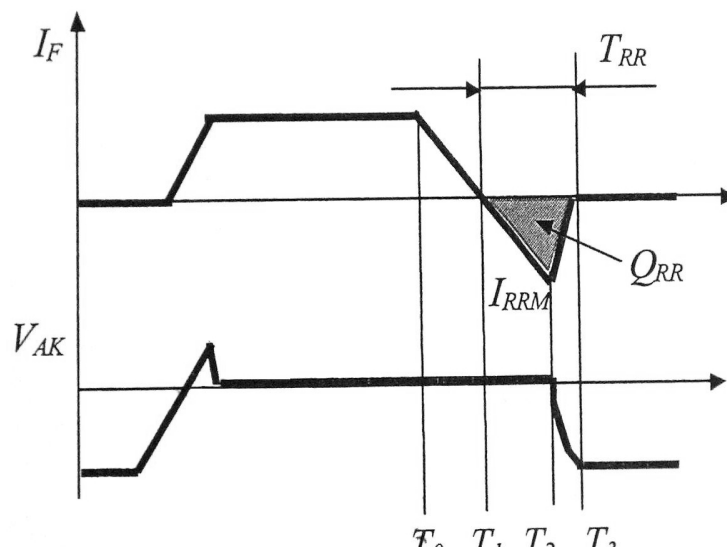
Durante la conducción, el diodo se puede representar con el siguiente modelo.



*Circuito equivalente de un diodo*

Una fuente de tensión,  $V_{TO}$ , que varía entre 0.8 y 2 V, en serie con una resistencia,  $r_T$ , de un valor de m $\Omega$ .

3.- Característica dinámica: Se representa en la siguiente imagen.



*Encendido y apagado de un diodo.*

- ENCENDIDO:

El diodo conduce si desde el sistema exterior se le aplica una tensión positiva. Sin embargo, dado que al principio no existen portadores de carga en el diodo se produce una tensión que alcanza incluso los 30V. Una vez que existen suficientes portadores como para que el diodo conduzca, la tensión en sus bornes disminuye hasta el valor de la tensión directa  $V_F$ .

- APAGADO:



1.- En  $T_0$  el circuito exterior hace que la corriente por el diodo empiece a bajar.

2.- Una vez que la corriente  $I_F$  se anula, en  $T_1$  el diodo está lleno de portadores de carga por lo que empieza a circular una corriente negativa correspondiente con la extracción de dichas cargas. Su valor máximo corresponde con la corriente de recuperación inversa máxima,  $I_{RRM}$  en  $T_2$ , y depende tanto de la corriente  $I_F$  del inicio como de  $dI_F/dt$  durante el apagado.

3.- Una vez termina la extracción de cargas el diodo se corta. La corriente varía bruscamente hasta anularse y la tensión se hace negativa hasta alcanzar un valor que depende del circuito exterior.

El tiempo comprendido entre  $T_1$  y  $T_3$  corresponde al tiempo de recuperación inversa  $T_{RR}$ , el tiempo que tarda en apagarse el diodo y las cargas extraídas corresponden a la  $Q_{RR}$ , carga de recuperación inversa.

- PERDIDAS EN EL DIODO:

Igual que en el IGBT, son el resultado de:

$$P_{diodo} = P_{estáticas} + P_{dinámicas(commutacion)} \left\{ \begin{array}{l} P_{estat} = P_{conducción} + P_{corte} \Rightarrow P_{corte} = 0W. \\ P_{conm} = P_{encend} + P_{apagado} \Rightarrow P_{encend} = 0W \\ \hline P_{conm} = (E_{on} + E_{off}) \cdot F_{con} \end{array} \right.$$

Las pérdidas estáticas por conducción se pueden calcular de dos formas:

- Usando la característica V-I del diodo polarizado en directa, en función de la corriente  $I_F$  obtenemos  $V_F$ .
- Sabiendo que en conducción se comporta según el circuito de la figura 1.19, se puede decir que:

$$P_{cond} = V_F(I_F) \cdot I_F \approx V_{TO} \cdot I_F + r_T \cdot I_F^2$$

Las pérdidas en el apagado se pueden calcular, aproximadamente, a partir de la carga de recuperación inversa ( $Q_{RR}$ ) y la tensión inversa,  $V_R$ , a la que corta el diodo impuesta por el sistema externo.

$$P_{\text{eff}} = E_{\text{eff}}(I_F, dI_F/dt, V_R) F_{\text{con}} \approx Q_{RR} V_R F_{\text{con}}$$

Igual que sucedía en un IGBT, las pérdidas en un diodo son considerables con el aumento de la frecuencia de conmutación. Y dado que su valor, como se verá más adelante, es elevado, será necesario el uso de un disipador de calor que evita el calentamiento del diodo y su posterior destrucción.

- Resumen: Finalmente, de la descripción del diodo, tanto en su estructura como en su funcionamiento se puede destacar:
1. Presenta 2 terminales: ánodo y cátodo.
  2. Es un semiconductor sin control de encendido y de apagado.
  3. Conduce si  $I_{AK} > 0$  y  $V_{AK} > 0$ , en esta situación el diodo está polarizado en directa. Entra en corte si  $V_{AK} < 0$  y  $I_{AK} = 0$ , en este estado el diodo está en inversa.
  4. Igual que en el IGBT, el diodo tiene pérdidas estáticas: por conducción y corte ( $\approx 0$ ); y pérdidas por conmutación: por el encendido ( $\approx 0$ ) y por el apagado.
  5. Las pérdidas del diodo aumentan con la frecuencia de conmutación.
  6. Será necesario utilizar UN DISIPADOR DE CALOR para evacuar dichas pérdidas.

#### 4.2.3 - La Inductancia

En electromagnetismo y electrónica, la inductancia (L), es una medida de la oposición a un cambio de corriente de un inductor o bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético, y se define como la relación entre el flujo magnético ( $\Phi$ ) y la intensidad de corriente eléctrica (I) que circula por la bobina y el número de vueltas (N) de el devanado:

$$L = \frac{\Phi N}{I}$$

La inductancia depende de las características físicas del conductor y de la longitud del mismo. Si se enrolla un conductor, la inductancia aumenta. Con muchas espiras se tendrá más inductancia que con pocas. Si a esto añadimos un núcleo de magnético, construido a base de chapas apiladas o de ferrita, aumentaremos considerablemente la inductancia.

El flujo que aparece en esta definición es el flujo producido por la corriente (I)

exclusivamente. No deben incluirse flujos producidos por otras corrientes ni por imanes situados cerca ni por ondas electromagnéticas.

Esta definición es de poca utilidad porque es difícil medir el flujo abrazado por un conductor. En cambio se pueden medir las variaciones del flujo y eso sólo a través del voltaje  $V$  inducido en el conductor por la variación del flujo. Con ello llegamos a una definición de inductancia equivalente pero hecha a base de variables que se pueden medir, esto es, la corriente, el tiempo y la tensión:

$$V_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

La bobina almacena energía eléctrica en forma de campo eléctrico cuando aumenta la intensidad de corriente, devolviéndola cuando ésta disminuye. Matemáticamente se puede demostrar que la energía  $E$ , almacenada por una bobina con inductancia  $L$ , que es recorrida por una corriente de intensidad  $I$ , viene dada por:

$$E = \frac{1}{2} LI^2$$

El valor de la inductancia, juega un papel muy importante a la hora de construir un convertidor reductor, ya que está nos limitará el rizado de la corriente a la salida del convertidor.

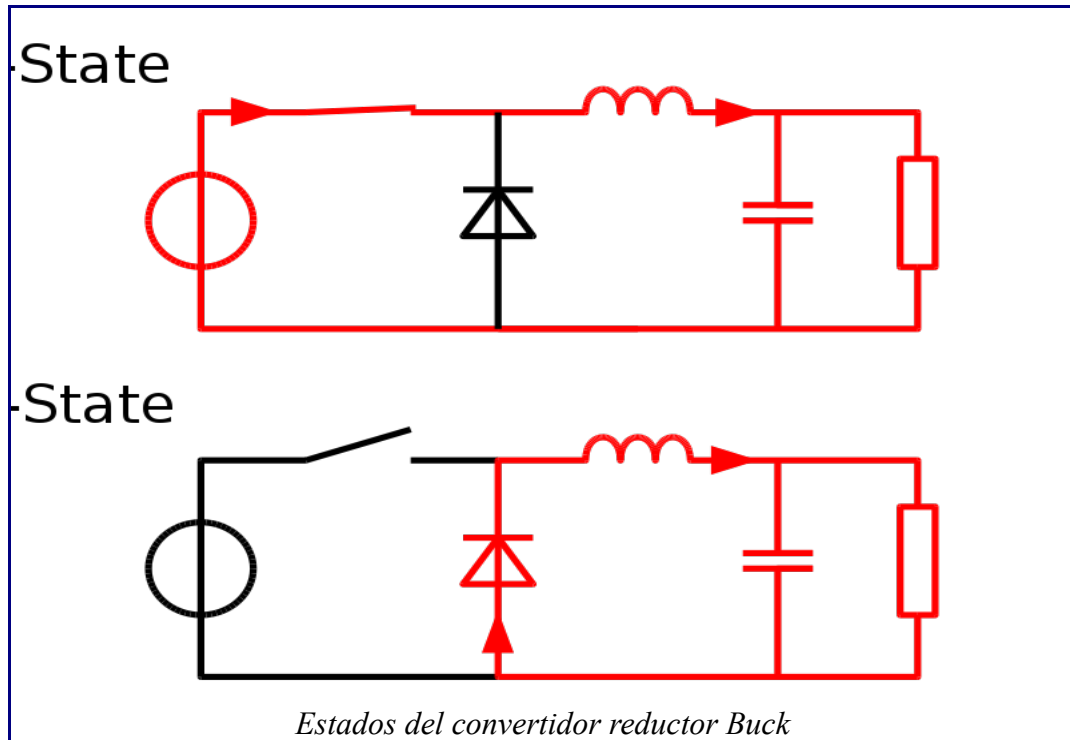
## **4.3 Convertidor Reductor dc-dc (Buck)**

El convertidor Buck (o reductor) es un convertidor de potencia que obtiene a su salida un voltaje continuo menor que a su entrada. Es una fuente conmutada con dos dispositivos semiconductores (transistor  $S$  y diodo  $D$ ), un inductor  $L$  y un condensador  $C$  a la salida.

La forma más simple de reducir una tensión continua (DC) es usar un divisor de tensión resistivo, pero los divisores gastan mucha energía en forma de calor. Por otra parte, un convertidor Buck puede tener una alta eficiencia (superior al 95% con circuitos integrados) y autoregulación.

### **4.3.1 - Estructura y funcionamiento del convertidor reductor**

El funcionamiento del convertidor Buck es sencillo, consta de un inductor controlado por dos dispositivos semiconductores los cuales alternan la conexión del inductor bien a la fuente de alimentación o bien a la carga.

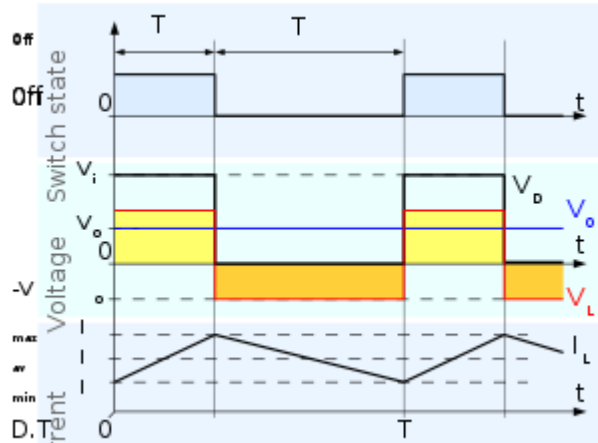


En la figura anterior se pueden observar los dos estados de conmutación del IGBT, cuando esta cerrado y abierto. En el primer estado se puede observar que toda la energía transferida de la fuente se la entrega a la bobina, al condensador y a la carga. En el segundo estado, cuando el IGBT se encuentra apagado, toda la energía almacenada en la bobina y en el condensador se la entregan a la carga circulando por el diodo.

### 4.3.2 – Funcionamiento en modo continuo

Se dice que un convertidor está en modo continuo si la corriente que pasa a través del inductor ( $I_L$ ) nunca baja a cero durante el ciclo de conmutación. En este modo, el principio de funcionamiento es descrito por el cronograma de la imagen que se muestra más adelante:

- Con el interruptor cerrado la tensión en el inductor es  $V_L = V_i - V_o$  y la corriente aumenta linealmente. El diodo está polarizado en inversa por lo que no fluye corriente por él.
- Con el interruptor abierto el diodo está conduciendo en directa. La tensión en el inductor es  $V_L = -V_o$  y la corriente disminuye.



*Evolución de las tensiones y corrientes en conducción continua de un buck*

La energía almacenada en el inductor es:

$$E = \frac{1}{2} L \times I_L^2$$

Como puede verse la energía almacenada en la bobina se incrementa en estado ON (interruptor cerrado) y disminuye durante el estado OFF (interruptor abierto). La bobina se usa para transferir energía desde la entrada a la salida.

La variación de  $I_L$  viene dada por:

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt}$$

Con  $V_L$  igual a  $V_i - V_o$  durante el estado a ON y a  $-V_o$  durante el estado OFF. El incremento de corriente en ON es:

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{t_{on}} dI_L = \int_0^{t_{on}} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_o) \cdot t_{on}}{L}$$

De la misma forma el decremento de corriente en OFF es:

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_0^{t_{off}} dI_L = \int_0^{t_{off}} \frac{V_L}{L} dt = -\frac{V_o \cdot t_{off}}{L}$$

Si se asume que el convertidor opera en un estado estable, la energía almacenada en

cada componente al final del ciclo de conmutación  $T$  es igual a que había al principio del ciclo. Esto significa que la corriente  $I_L$  es igual en  $t=0$  y en  $t=T$  (ver figura 2.2).

Por lo tanto,  $\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0$

De las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\frac{(V_i - V_o) \cdot t_{on}}{L} - \frac{V_o \cdot t_{off}}{L} = 0$$

Como se puede ver en la figura 2.2  $t_{on} = D \cdot T$  y  $t_{off} = T - D \cdot T$ .  $D$  es un escalar llamado ciclo de trabajo, cuyo valor está comprendido entre 0 y 1:

$$(V_i - V_o) \cdot D \cdot T - V_o \cdot (T - D \cdot T) = 0$$

Esta ecuación puede ser reescrita como:

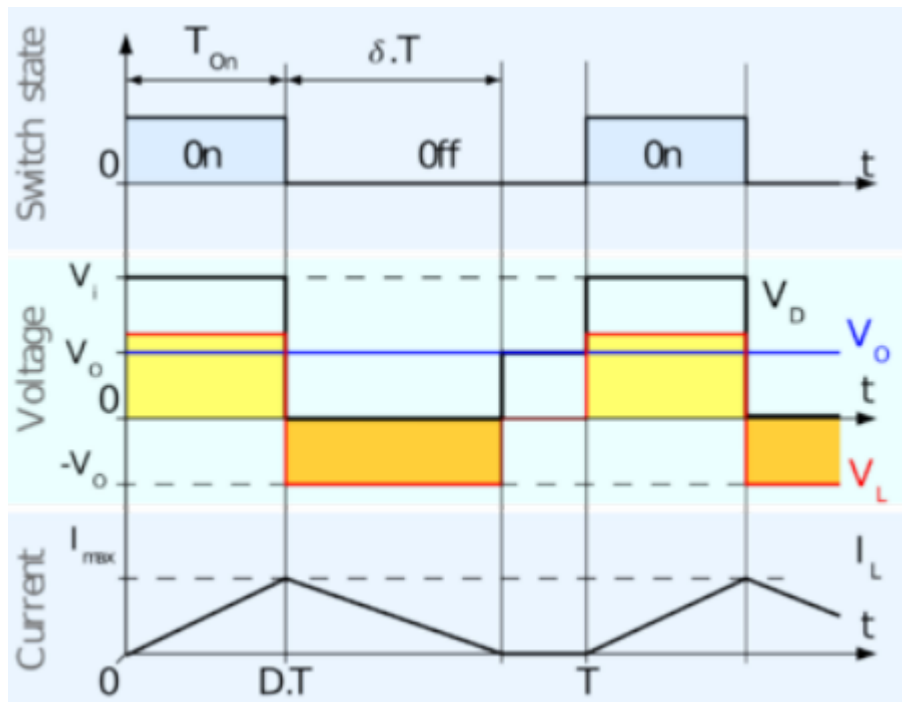
$$V_o = D \cdot V_i$$

De esta ecuación se puede observar como la tensión de salida del convertidor varía linealmente con el ciclo de trabajo para una tensión de entrada dada. Como el ciclo de trabajo  $D$  es igual al cociente entre  $t_{on}$  y el periodo  $T$  no puede ser mayor a 1. Por consiguiente  $V_o \leq V_i$ , de ahí su nombre de reductor.

### 4.3.3 – Funcionamiento en modo discontinuo

En algunos casos la cantidad de energía requerida por la carga es tan pequeña que puede ser transferida en un tiempo menor que el periodo de conmutación; en este caso la corriente a través de la bobina cae a cero durante una parte del periodo. La única diferencia con el funcionamiento descrito antes es que el inductor está completamente descargado al final del ciclo de conmutación, esto se puede ver en la siguiente imagen. Esto tiene algunos efectos sobre las ecuaciones anteriores.





*Evolución de las tensiones y corrientes en conducción discontinua de un Buck*

La energía en el inductor sigue siendo la misma al principio y al final del ciclo (esta vez de valor cero). Esto significa que el valor medio de la tensión del inductor ( $V_L$ ) es cero (el área de los recuadros amarillos y naranjas de la figura es igual)

$$(V_i - V_o) D \cdot T - V_o \cdot \delta \cdot T = 0$$

De esta manera el valor de  $\delta$  es:

$$\delta = \frac{V_i - V_o}{V_o} D$$

La corriente de salida entregada a la carga ( $I_o$ ) es constante. También se supone que la capacidad del condensador de salida es suficientemente alta para mantener constante el nivel de tensión en sus terminales durante un ciclo de conmutación. Esto implica que la corriente que pasa a través del condensador tiene como valor medio cero, así que la corriente media en la bobina será igual a la corriente de salida:

$$\bar{I}_L = I_o$$

Como se puede ver en la figura 4, la forma de onda de la corriente en el inductor es triangular, por consiguiente el valor medio de  $I_L$  puede ser calculado geoméricamente:

$$\bar{I}_L = \left( \frac{1}{2} I_{L_{max}} \cdot D \cdot T + \frac{1}{2} I_{L_{max}} \cdot \delta \cdot T \right) \frac{1}{T} = \frac{I_{L_{max}} (D + \delta)}{2} = I_o$$

La corriente en el inductor es cero al principio y aumenta durante  $t_{On}$  hasta llegar a  $I_{L_{max}}$ . Esto significa que  $I_{L_{max}}$  es igual a:

$$I_{L_{Max}} = \frac{V_i - V_o}{L} D \cdot T$$

sustituyendo el valor de  $I_{L_{max}}$  en la ecuación anterior:

$$I_o = \frac{(V_i - V_o) D \cdot T (D + \delta)}{2L}$$

Y sustituyendo  $\delta$  por la expresión dada:

$$I_o = \frac{(V_i - V_o) D \cdot T \left( D + \frac{V_i - V_o}{V_o} D \right)}{2L}$$

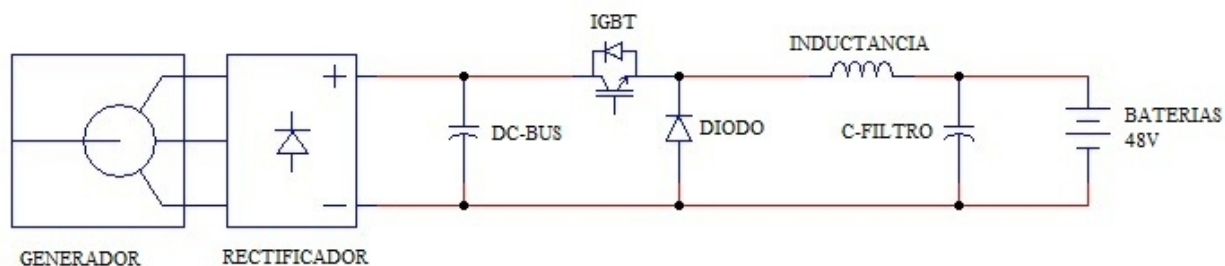
Que puede ser reescrito como:

$$V_o = V_i \frac{1}{\frac{2L \cdot I_o}{D^2 \cdot V_i \cdot T} + 1}$$

Como se puede ver la tensión de salida de un convertidor Buck en modo discontinuo es más complicada que en modo continuo. Además la tensión de salida es función no sólo de la tensión de entrada ( $V_i$ ) y el ciclo de trabajo ( $D$ ), sino también del valor de la bobina ( $L$ ), el periodo de conmutación ( $T$ ) y la corriente de salida ( $I_o$ ).

## 4.4 - Convertidor electrónico construido

Para adecuar la tensión generada por el generador para cargar las baterías se ha construido un convertidor electrónico compuesto por un puente rectificador de diodos y un reductor buck. Este sistema también sirve para obtener en cada momento el mayor rendimiento posible. En la siguiente imagen se muestra un esquema del generador, el convertidor y las baterías.



Esquema global del sistema

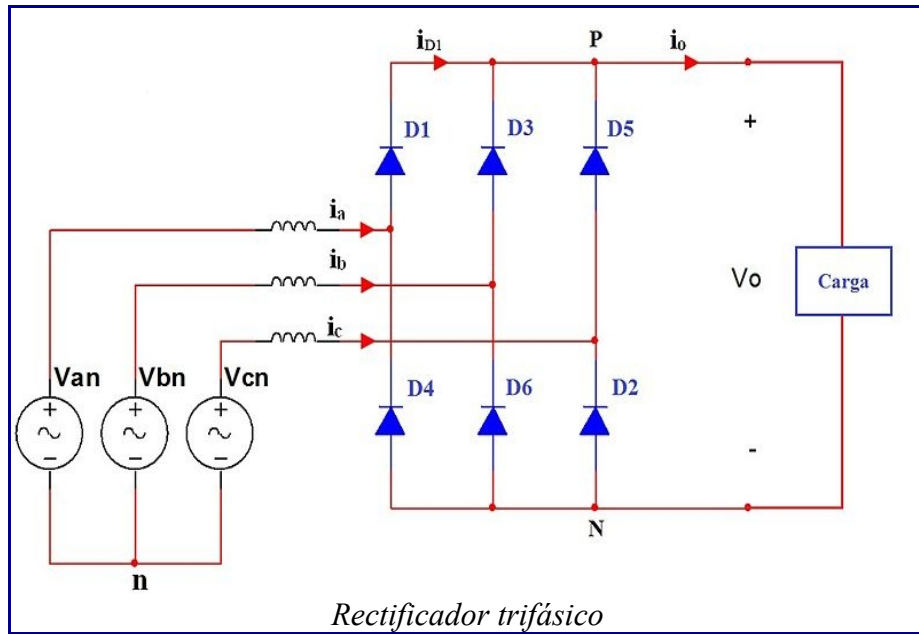
## 4.4.1 – Componentes utilizados en el convertidor

A continuación se muestran los componentes utilizados en este convertidor, las características principales de ellos y los parámetros de diseño por los que se han escogido.

### 4.4.1.1 - Rectificador trifásico

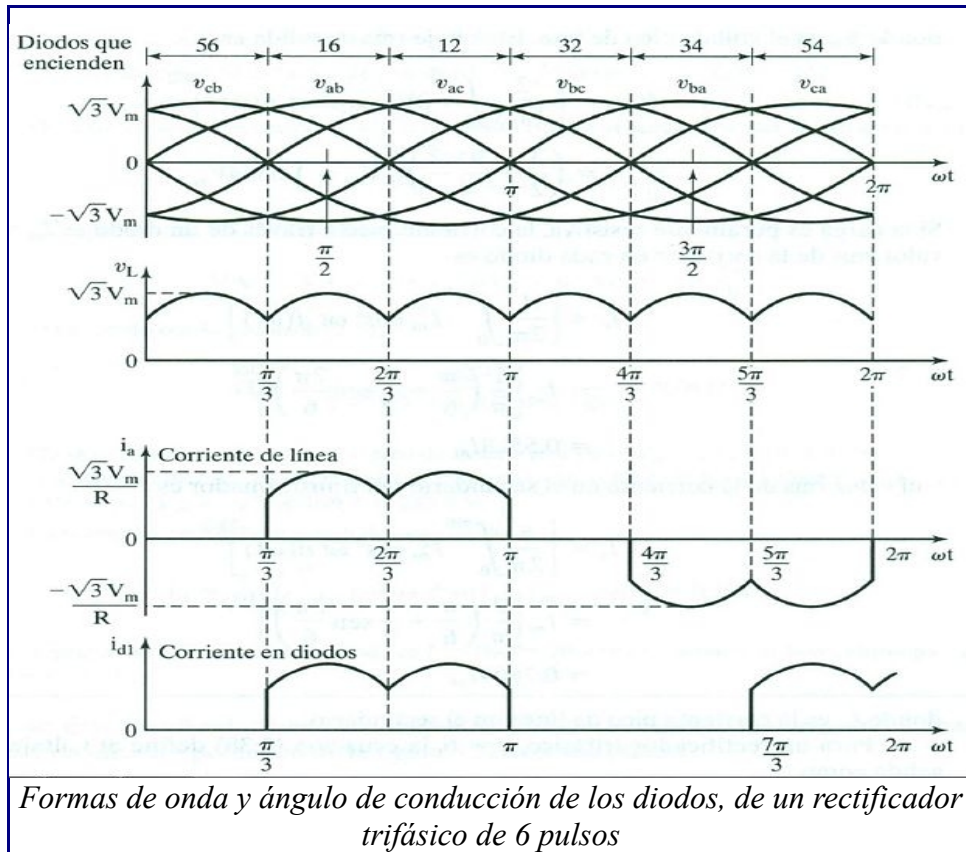
El generador eléctrico del aerogenerador es un motor síncrono trifásico de imanes permanentes con 6 pares de polos. Como se puede observar, el aerogenerador produce una corriente trifásica a diferentes frecuencias, ya que el aire, que es la fuerza motriz del motor, es variable.

El convertidor reductor es apto para tensiones en continua, para ello se debe rectificar la tensión generada por el aerogenerador. La forma más eficaz de pasar de una tensión alterna a continua, es utilizando un puente de diodos (monofásico) o un rectificador trifásico.



De esta forma se obtendrá una tensión continua que será apta para el convertidor reductor.

Este tipo de rectificadores emplea como semiconductor el diodo. Se denominan de este modo porque no se puede controlar la potencia de salida, es decir, para una tensión fija de entrada la tensión de salida es también fija. En un circuito rectificador trifásico no controlado de 6 pulsos, los diodos se enumeran en el orden de las secuencias de conducción y cada uno conduce durante  $120^\circ$  del periodo. La secuencia de conducción para los diodos son D1-D2, D3-D2, D3-D4, D5-D4, D5-D6, D1-D6.



En un sistema trifásico equilibrado los voltajes de línea a neutro están definidos por:

$$\begin{aligned}v_{an} &= V_m \sin(\omega t) \\v_{bn} &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\v_{cn} &= V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}$$

Los voltajes correspondientes de línea a línea ( $V_{LL}$ ) son:

$$\begin{aligned}v_{ab} &= \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \\v_{ab} &= \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \\v_{ca} &= \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)\end{aligned}$$

El voltaje promedio de salida se puede determinar mediante:

$$V_{DC} = \frac{2}{2\pi/6} \int_{wt=0}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3}V_m \cos(wt) d(wt)$$
$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

Donde  $V_m$  es el voltaje pico de fase o voltaje máximo, el voltaje promedio DC también lo podemos expresar en función del voltaje línea a línea, mediante la siguiente expresión:

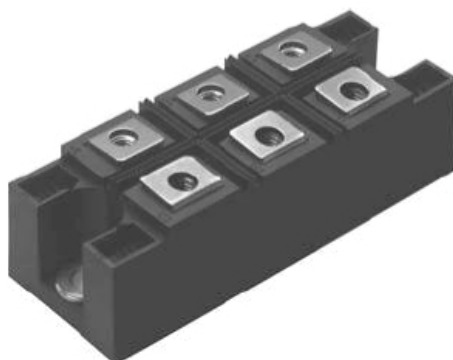
$$V_m = \sqrt{2}V_s = \sqrt{2} \left( \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} \right)$$
$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL}$$

El valor rms del voltaje de salida esta dado por:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{2\pi/6} \int_{wt=0}^{\frac{\pi}{6}} [\sqrt{3}V_m \cos(wt)]^2 d(wt)}$$
$$V_{rms} = \left( \frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi} \right) V_m$$
$$V_{rms} = \left( \frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi} \right) \left( \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) V_{LL}$$

El rectificador elegido para la construcción del aerogenerador es el modelo 130MT120k de I fabricante Vishay. Su corriente nominal es de 130A a 85°C y su tensión de aislamiento es de 1200V. En la siguiente imagen se puede ver el rectificador:



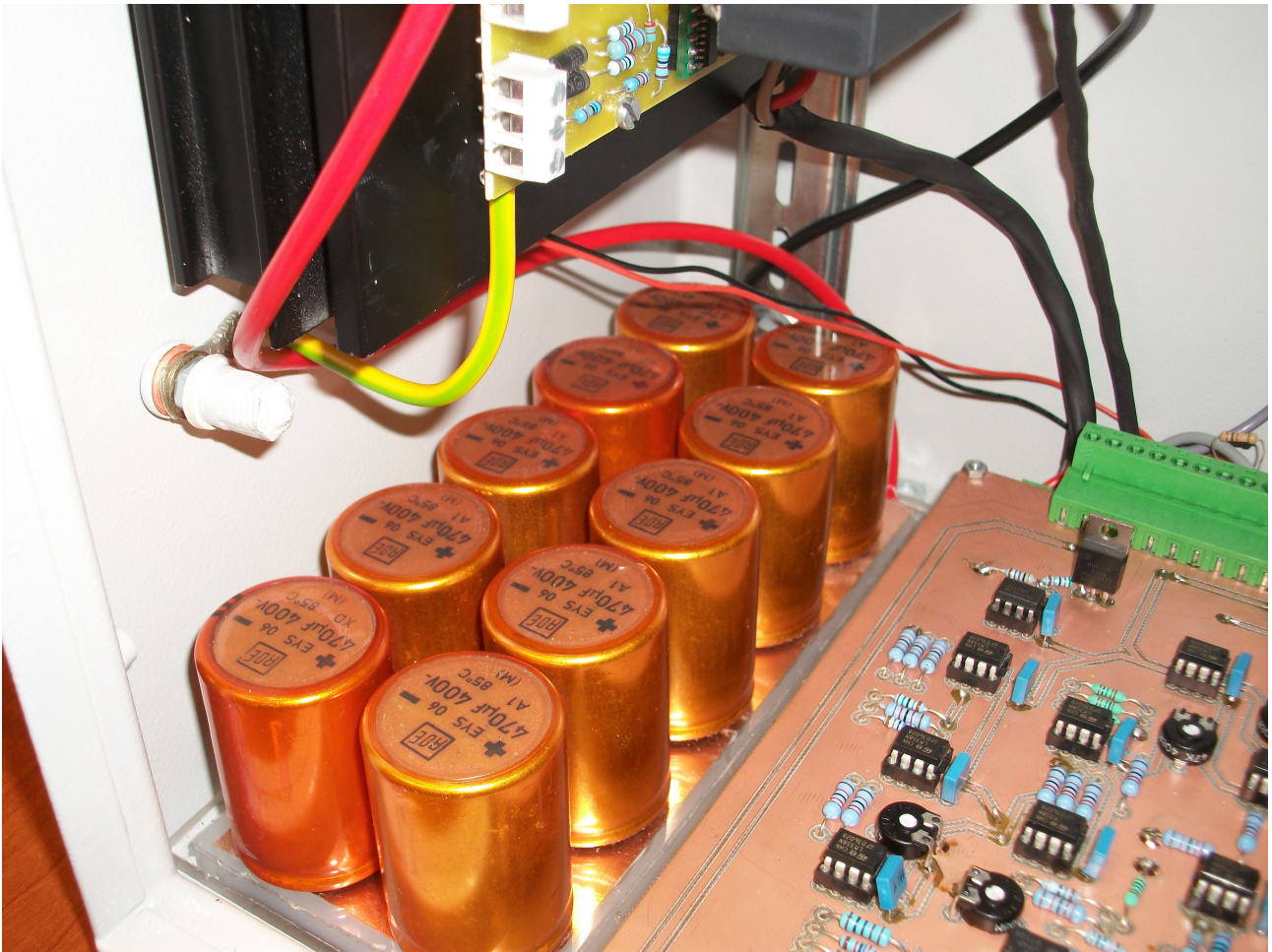


**MTK**

*Rectificador trifásico Vishay*

#### **4.4.1.2 - Bus de continua del convertidor reductor**

El rectificador trifásico da genera a un rizado de tensión en el bus de continua. Para minimizar este rizado se han utilizado 10 condensadores electrolíticos con una tensión de aislamiento de 400 Voltios y una capacidad de  $470_{\mu}F$ , se han combinado en serie por parejas y las parejas se han conectado en paralelo. De esta forma se ha conseguido un bus de continua con una tensión de aislamiento de 800 Voltios y  $2350_{\mu}F$ . Con esta capacidad se consigue que el rizado de tensión sea menor del 5%.



*Bus de continua*

#### 4.4.1.3 - Bloque de conmutación

Partiendo como base de que nuestro convertidor tenga que soportar como mínimo 450 Vdc y una corriente de 80 Amperios se debe de encontrar un bloque de conmutación que corresponda a estas características:

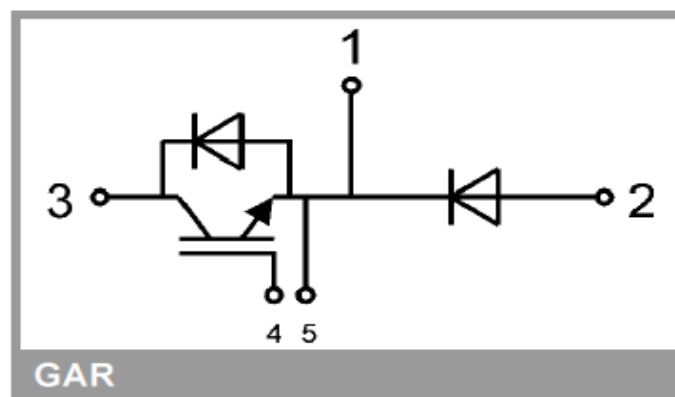
- Un IGBT y un diodo en serie (diodo en antiparalelo)
- Tensión de aislamiento de 1200V dc. Esta tensión es notablemente mayor que la del bus para, esto se debe a que las sobretensiones generadas por las inductancias parásitas del bloque al conmutar pueden tener picos que un bloque de 600V no puede soportar.
- Tiene que soportar 80 amperios como mínimo para poder trabajar cuando el aerogenerador se encuentre a plena potencia.
- El IGBT deberá de encenderse a +15V y apagarse a -8V, ya que el driver trabaja a esa tensión.

- Tiene que ser capaz de conmutar a 10KHz.

El Bloque de conmutación elegido es un SEMIKRON de tipo GAR. Con una corriente nominal de 150A y una tensión de aislamiento de 1200V, su referencia es SKM150GAR12T4



*Bloque de conmutación  
SKM150GAR12T4*



*Esquema eléctrico del bloque de conmutación.*

En la figura anterior se representa el esquema eléctrico del bloque de conmutación que sirve exactamente para un convertidor reductor, ya que sus semiconductores están diseñados para este tipo de aplicación.

Las patas 3 y 2 se conectarán al bus de continua, y la pata 1 se conectará directamente a la inductancia del convertidor. Las patas 4 y 5 son las que se conectan al driver, que le mandará las ordenes de encendido y apagado mediante una señal de +15V (encendido) y -8V (apagado).

Characteristics						
Symbol	Conditions		min.	typ.	max.	Unit
IGBT						
V <sub>CE(sat)</sub>	I <sub>C</sub> = 150 A	T <sub>J</sub> = 25 °C		1.8	2.05	V
	V <sub>GE</sub> = 15 V chiplevel	T <sub>J</sub> = 150 °C		2.2	2.4	V
V <sub>CE0</sub>		T <sub>J</sub> = 25 °C		0.8	0.9	V
		T <sub>J</sub> = 150 °C		0.7	0.8	V
r <sub>CE</sub>	V <sub>GE</sub> = 15 V	T <sub>J</sub> = 25 °C		6.7	7.7	mΩ
		T <sub>J</sub> = 150 °C		10.0	10.7	mΩ
V <sub>GE(th)</sub>	V <sub>GE</sub> =V <sub>CE</sub> , I <sub>C</sub> = 6 mA		5	5.8	6.5	V
I <sub>CES</sub>	V <sub>GE</sub> = 0 V	T <sub>J</sub> = 25 °C		0.1	0.3	mA
	V <sub>CE</sub> = 1200 V	T <sub>J</sub> = 150 °C				mA
C <sub>ies</sub>	V <sub>CE</sub> = 25 V	f = 1 MHz		9.3		nF
C <sub>oes</sub>	V <sub>GE</sub> = 0 V	f = 1 MHz		0.58		nF
C <sub>res</sub>		f = 1 MHz		0.51		nF
Q <sub>G</sub>	V <sub>GE</sub> = - 8 V...+ 15 V			850		nC
R <sub>Gint</sub>	T <sub>J</sub> = 25 °C			5.0		Ω

*Características técnicas del bloque de conmutación*

Este bloque de conmutación cumple los requisitos mínimos para el convertidor electrónico del aerogenerador. Soporta sin problemas las tensión del bus de continua más las sobretensiones debidas a la conmutación y es capaz de soportar una corriente de 80A.

#### 4.4.1.4 - Condensador de desacoplo

Todos los bloques de conmutación deben de llevar un condensador rápido de desacoplo, ya que la alta frecuencia de conmutación, la alta tensión de trabajo y las inductancias parásitas crean una sobretensión entre el colector y el cátodo del diodo (bus de continua). Para ello se debe poner un condensador, para que absorba toda esa sobretensión. Este componente debe de situarse lo mas cerca posible del bloque de conmutación para absorber esa sobretensión. Si el condensador se sitúa más alejado, los conductores que unen el condensador con el bloque de conmutación suponen una inductancia parásita que impide al condensador eliminar esas sobretensiones, ya que estas sobretensiones son de muy alta frecuencia y la inductancia no permite que lleguen al condensador.



Condensador de desacoplo

Este condensador que se muestra en la figura anterior es el que se ha utilizado. Tiene una capacidad de 20 $\mu$ F y 1000v de aislamiento. Para este tipo de aplicaciones suele bastar con condensadores con capacidades comprendidas entre 3 $\mu$ F y 5 $\mu$ F. Se ha escogido el valor de 20 $\mu$ F porque minimiza el valor de las sobretensiones, lo que protege aun más el bloque de conmutación.

#### 4.4.1.5 - Inductancia

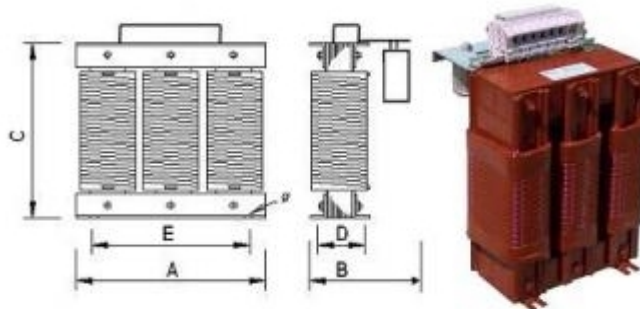
La inductancia es el componente clave de este convertidor electrónico. Normalmente este tipo de convertidores van asociados a un motor eléctrico de corriente continua, cuyo bobinado supone una gran inductancia, por lo que no es necesario colocar una inductancia. Este convertidor debe de incluir una bobina, ya que su carga son unas baterías de plomo-ácido.

El valor de la inductancia es muy importante ya que está asociado al rizado de la corriente. Cuanto mayor sea el valor de la inductancia el rizado de la corriente disminuirá.

$$\Delta i_L = V_{ent} \frac{(1-D)D}{F_{con} L}$$

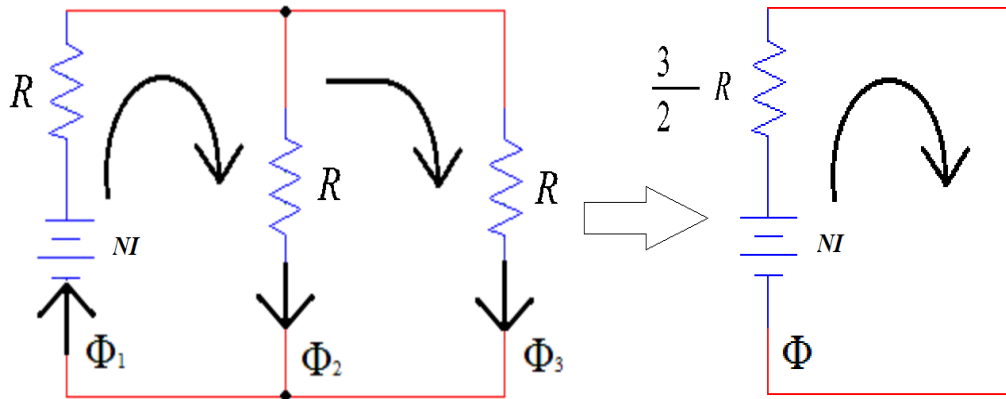
Como se demuestra en la formula el rizado de la corriente de salida del convertidor, depende de:  $F_{con}$ ,  $V_{ent}$ , Ciclo de trabajo(D) y del valor de la inductancia (L)

Para la elección de la inductancia se ha escogido una trifásica, ya que combinando su tres fases se puede llegar a aumentar su inductancia 4 veces.



Inductancia del convertidor

Esta inductancia es trifásica, tiene como valor 0,276mH por fase y soporta 80 amperios por fase. Al combinar las líneas de las tres fases se obtiene una inductancia 4 veces superior, es decir 1,104mH. Esto significa que en el peor caso de rizado corriente, el valor del rizado será 4 veces menor.

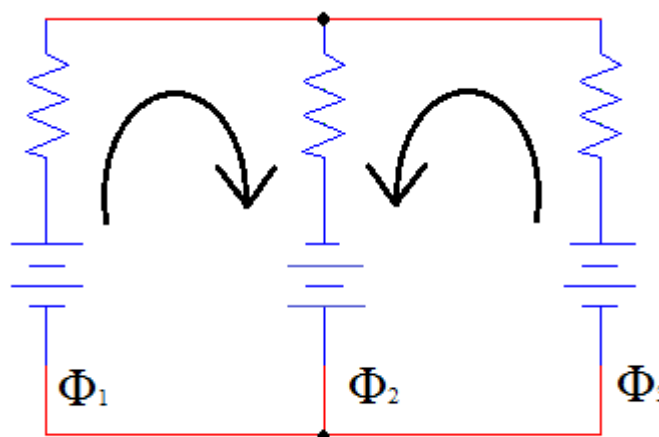


*Inductancia trifásica con una sola fase conectada y su equivalente monofásico*

En la figura anterior se muestra la inductancia total alimentando una sola fase. Realizando el siguiente calculo se puede demostrar que el valor total de la inductancia es:

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{2}{3} \frac{N}{I} \frac{N \cdot I}{R} = \frac{2}{3} \frac{N^2}{R} = 0,276 \text{ mH}$$

Para aprovechar al máximo la inductancia trifásica se deben de combinar las tres fases para maximizar la inductancia total. En la siguiente imagen se puede observar el valor de los flujos para el tipo de conexión con el cual se obtiene la mayor inductancia.



*Inductancia trifásica con las tres fases alimentadas*

En la imagen anterior se observa que todas las fases están alimentadas. Obtiene un flujo



magnético tal y como se muestra en la imagen. Si se realizan los cálculos del valor de la inductancia total se obtiene:

Fase 1:

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{2}{3} \frac{N}{I} \frac{N * I}{R} = \frac{2}{3} \frac{N^2}{R}$$

Fase 2:

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{4}{3} \frac{N}{I} \frac{N * I}{R} = \frac{4}{3} \frac{N^2}{R}$$

Fase 3:

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{2}{3} \frac{N}{I} \frac{N * I}{R} = \frac{2}{3} \frac{N^2}{R}$$

El resultado total es:

$$L = \frac{8}{3} \frac{N^2}{R} = 1.104\text{mH}$$

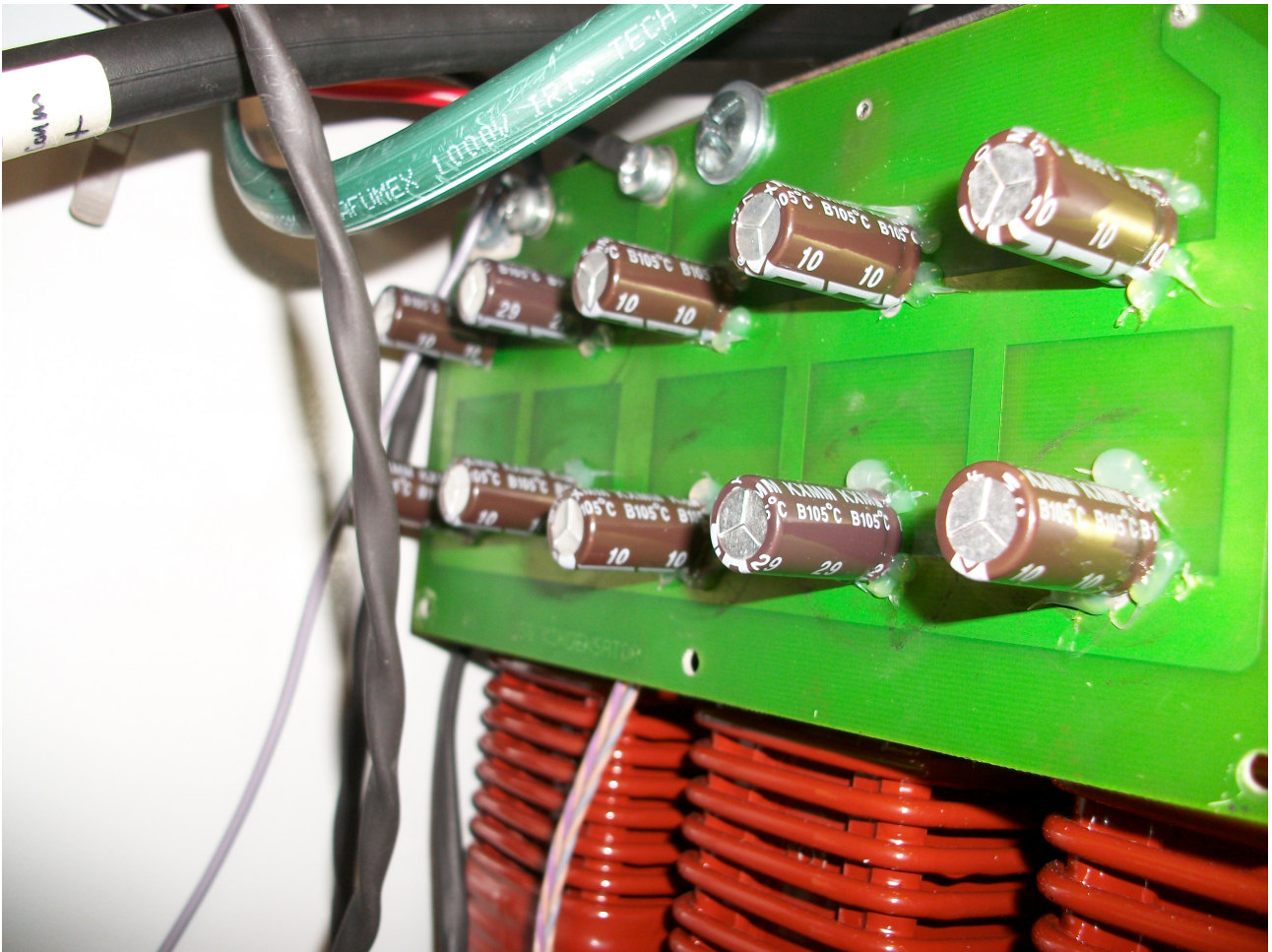
Como se puede observar en la formula anterior, el valor de la inductancia con esta combinación es cuatro veces superior que si se conecta una sola fase. Para esta inductancia el valor del rizado de corriente es de 4A, lo que supone rizado del 5%. El valor de rizado máximo aceptable es del 10%, este convertidor tiene la mitad de rizado, por lo que la inductancia cumple con creces su objetivo.

#### 4.4.1.5 - Condensadores de la salida del convertidor

La función de estos condensadores es la misma que la de los condensadores del bus de continua, estabilizar la tensión de salida para que su rizado sea menor. Estos condensadores, junto con la inductancia, forman un filtro paso bajo, para la frecuencia de corte se escoge un valor del 3% de la frecuencia de conmutación. Para calcular la capacidad se utiliza la siguiente fórmula:

$$C \geq \frac{1}{0,03^2 * F_{con}^2 * 4 * \pi^2 * L}$$

El valor de capacidad calculado es de 255µF. Esta capacidad tiene que soportar la corriente de rizado, que como máximo es de 4A. Como no se han podido adquirir condensadores de esta capacidad y que puedan soportar 4A, se han colocado diez condensadores electrolíticos de 270µF y una tensión de aislamiento de 63V. La tensión máxima que soportarán estos condensadores es la tensión de las baterías, que como máximo será de 56V. El valor total de la capacidad es de 2700µF.



*Condensadores del filtro*

## 4.4.2- Control del convertidor electrónico

El control del convertidor se le podría denominar también como el cerebro de toda la electrónica, ya que actúa de forma en que el usuario lo desea.

El control del convertidor está construido de forma analógica, ya que la construcción, del mismo es más fácil de realizar. Para ello se utilizan circuitos integrados, resistencias de precisión y sensores de corriente y de tensión.

### 4.4.2.1 - Lazo de Corriente

Este convertidor electrónico posee un lazo de corriente, ya que lo único que va a controlar será la corriente de entrada a las baterías, que se regula según de la potencia que pueda generar el aerogenerador.

Como bien se ha comentado antes este convertidor es un reductor dc-dc, se podría decir

que su función es disminuir la tensión de la salida respecto a la de la entrada. En este caso la tensión de salida estará entre 42V y 56V, que están impuestos por las baterías. La tensión de entrada es variable y depende del motor del aerogenerador.

La potencia que suministra el aerogenerador al convertidor depende de la velocidad del viento, como la velocidad de la punta de las palas tiene que ser seis veces superior a la del viento, cada velocidad de viento tendrá una tensión y una corriente asociadas para obtener el máximo rendimiento, el valor máximo de potencia será de 80A. Cuanto mayor sea la tensión de entrada del convertidor, mayor será la potencia y la corriente de salida del convertidor. El control de este convertidor sirve para maximizar el rendimiento del aerogenerador en cada momento.

El lazo de corriente sirve para controlar la corriente del convertidor. Por un lado, recibe una señal proporcional a la corriente de salida ( $I_{med}$ ) y por otro lado, recibe una señal llamada corriente de referencia ( $I_{ref}$ ), que indica el valor que tiene que tener la corriente. El lazo hace la resta entre la referencia y la medida, obteniendo un error de corriente. Este error llega al regulador PI, que modifica su señal de salida en función del error. Esta señal llega a un comparador de donde sale la señal de conmutación. El PI varía el ciclo de trabajo mediante la variación de su señal de salida, de esta manera trabaja para que en todo momento el error sea cero, es decir, que el valor de la corriente que va a las baterías sea en cada momento la que indica la referencia.

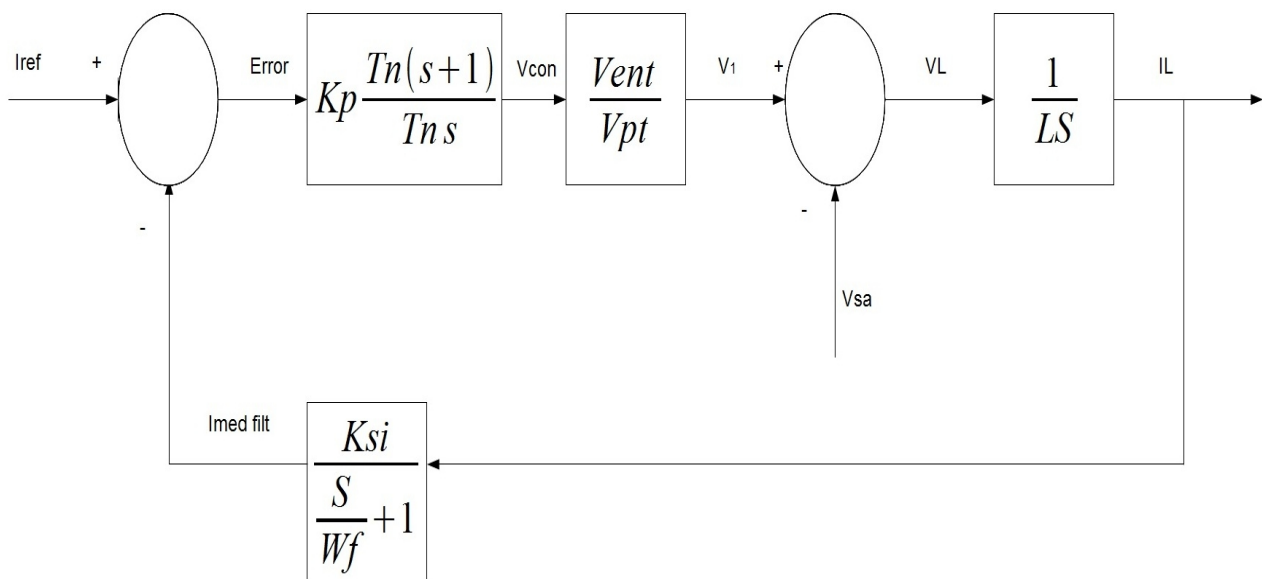


Diagrama de bloques del lazo de corriente

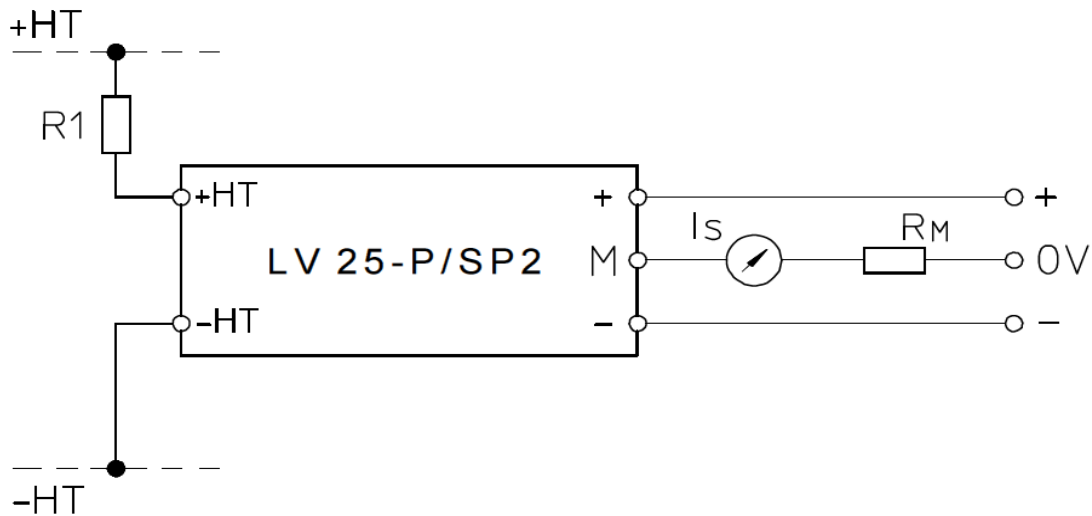
#### 4.4.2.2 - Medida de la tensión y la corriente

Todas las medidas y todos los sensores de la placa del control están aislados de la electrónica de potencia, de esta forma se evita que entre cualquier perturbación en el circuito de control que pueda hacerle fallar en su funcionamiento.

- Medida de la tensión:

La corriente de referencia se calcula mediante la tensión del bus de continua. El valor de la tensión es proporcional a la velocidad, por lo que con la medida de la tensión se puede estimar el valor de la corriente para obtener el rendimiento óptimo. Para tomar esta medida se utiliza un

transductor de tensión. El transductor que se utiliza para medir la tensión es el sensor LEM-LV 25-P.



*Esquema del transductor de tensión*

Este transductor de tensión está alimentado a  $\pm 15$  V y como se puede observar en la imagen, el transductor nos proporciona a la salida una corriente proporcional a la corriente de entrada.

El convertidor electrónico está diseñado para soportar 1000 Vdc, pero la tensión máxima de trabajo es de 450Vdc. En la entrada del transductor posee una resistencia de 47 K $\Omega$  (R1), de esta forma se limita la corriente de entrada a la célula Lem. En la salida de la célula existe una fuente de corriente que es proporcional a la corriente de entrada, pero el control del convertidor funciona con tensión, para ello tiene una resistencia de 390 $\Omega$ . De esta manera, cuando exista una tensión de 450Vdc en la entrada se obtiene 10Vdc en la salida. Este sensor proporciona aislamiento entre la etapa de control y la de potencia.

Esta medida de tensión necesita un filtro paso bajo para que el rizado de la tensión del bus no perturbe la medida de tensión. El rizado de la tensión tiene una frecuencia seis veces superior que la de la tensión del generador, esto es debido a que al rectificar la tensión, por cada ciclo en la parte alterna, aparecen seis ciclos en la tensión rectificada. El motor es de seis pares de polos y genera en un rango de velocidades de entre 50 y 300rpm, las frecuencias de rizado de la tensión rectificada oscilarán entre 30 y 180Hz.

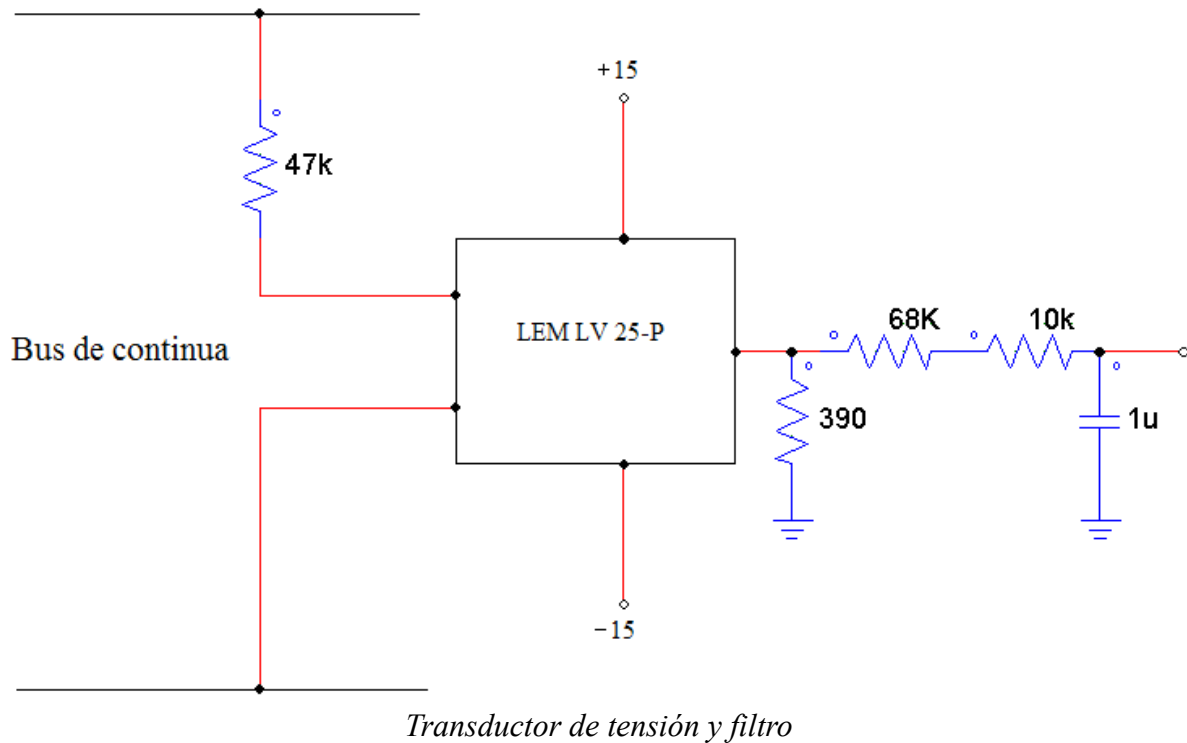
A 30Hz el convertidor tiene que empezar a suministrar potencia, para que no haya problemas con la medida de tensión en el arranque, el valor de la medida tiene que ser preciso a partir de unos 20Hz. Se coloca un filtro paso bajo en la tensión medida, como a 20Hz hace falta una medida fiable la frecuencia de corte del filtro tiene que ser una década menor, es decir, de 2Hz. Este filtro se implementa mediante una resistencia y un condensador, para el cálculo de sus valores se utiliza la siguiente fórmula.

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Para calcular la resistencia y el condensador, lo más fácil es imponer un condensador y a partir de este calcular la resistencia, ya que existe mayor variedad de resistencias. En este

### *Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga*

convertidor el condensador lleva un valor  $1\mu\text{F}$  y la resistencia es de  $78\text{K}\Omega$ , como este valor de resistencia no es estándar se colocan dos resistencias de  $68\text{K}\Omega$  y  $10\text{K}\Omega$  en serie, consiguiendo una frecuencia de corte de  $2,04\text{ Hz}$ . En la siguiente imagen se puede ver el transductor con el circuito de medida. Para que no se absorba corriente del filtro, se coloca un seguidor a la salida.



- Medida de la corriente (Imed):

La lectura de la corriente del convertidor se debe de tomar a la salida de la inductancia, ya que la corriente se presenta mas estable. La medida de corriente se hace mediante un transductor de corriente de efecto hall. Este tipo de sensores son capaces de leer corrientes en continua. Este convertidor en concreto lleva una célula Lem Hal 100-S.

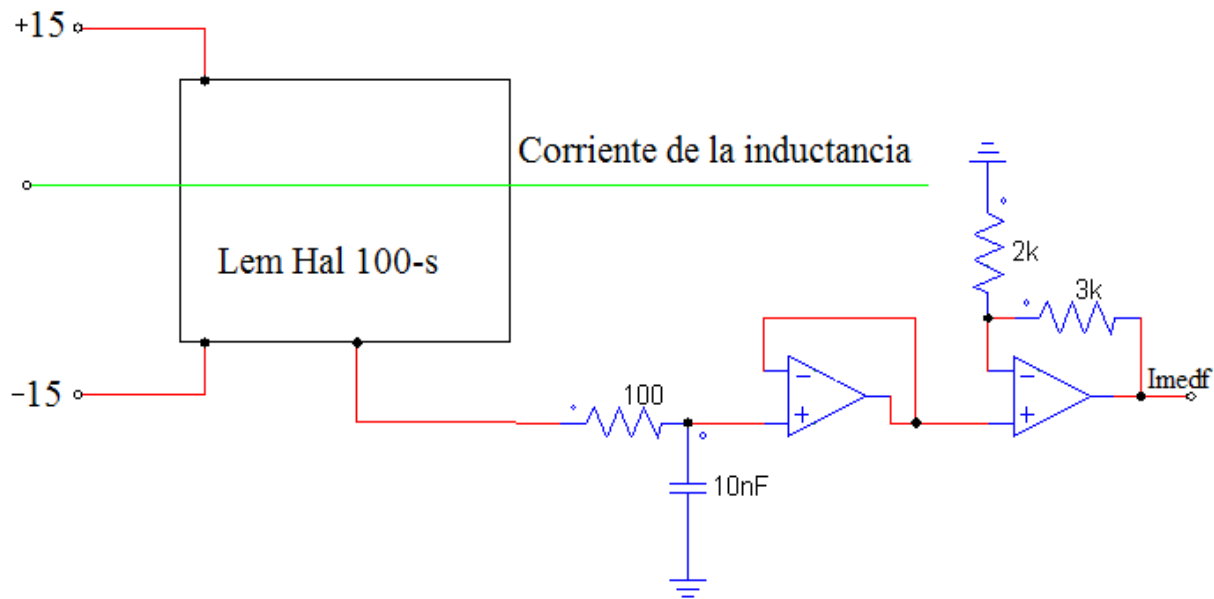
Este sensor de corriente es capaz de medir una corriente continua hasta 100A nominales, posee una ganancia de señal regulable y un offset para ajustar el 0 de la señal.

La salida del transductor es de + / - 4V máximo. Esto significa que se debe de aplicar una ganancia de modo que la tensión máxima sea 10Vdc, de esta forma el control funcionara entre 0-10Vdc.

En la siguiente figura se muestra el sensor de corriente con su filtro y ganancia. El convertidor conmuta a 10KHz, por lo que el rizado de la corriente es del doble de frecuencia, 20KHz. La frecuencia de corte del filtro paso bajo debe ser como mínimo de una frecuencia que esté una década por debajo, es decir, de 2000Hz o menos. Para el filtro se ha escogido una frecuencia de corte de 1500Hz, que se ha implementado con un filtro RC, como el de la medida de la tensión, con una resistencia de 10KΩ y un condensador de 10nF. A continuación se coloca un seguidor, para conseguir que no se absorba corriente del sensor, a la tensión de la salida del seguidor se le llama corriente medida y filtrada(Imedf).

El valor de la medida está entre 0 y 4V, para el PI, el valor de la corriente medida debe estar entre 0V y 10V, por lo que se ha colocado un amplificador operacional, con dos resistencias de 2KΩ y 3KΩ, que aporta una ganancia de 2,5, consiguiendo que la señal de la medida esté entre 0V y 10V para corrientes comprendidas entre 0A y 80A.





*Transductor de corriente con filtro, seguidor y ganancia*

Una vez obtenidas la  $I_{ref}$  y la  $I_{medf}$  ya se puede proceder a calcular el regulador PI que regulará la potencia del convertidor.

#### 4.4.2.3 - Regulador PI

En los convertidores electrónicos los reguladores se implementan de manera que el sistema sea estable y rápido. Todos los reguladores tienen la misma función. Su función es eliminar el error que pueda existir entre la señal de referencia y la medida. Este convertidor en concreto posee un regulador proporcional integrado. La parte proporcional se encarga de darle rapidez al sistema y la parte integral de que sea estable.

Para calcular el PI se debe de conocer la función de transferencia en Lazo abierto y en Lazo cerrado.

$$[LA(w)] = Kp \frac{\sqrt{((tn w)^2 + 1^2)}}{tn w} \frac{V_{ent}}{V_{pt}} \frac{1}{Lw} \frac{K_{si}}{\sqrt{((\frac{w}{wf})^2 + 1^2)}} = 1$$

En la fórmula anterior se muestra la función de transferencia del convertidor en lazo abierto. Para la implementación del PI analógico se debe de calcular  $tn$  (constante de tiempo) y la  $Kp$  (ganancia del PI) de la función de transferencia.

Antes de empezar a calcular se debe de conocer todos los valores de la función de transferencia:

- $K_{si}$ : es la ganancia que tiene sensor de corriente y el valor es:

$$K_{si} = \frac{10}{80} = 0,125$$

- Vent: es el valor máximo de tensión del bus de continua, 450Vdc.
- Vpt: es el valor del pico de la triangular, 10Vdc.
- Wf: es el valor de la frecuencia de corte del filtro del sensor de corriente en radianes,  $3000\pi$ .
- W: es el valor de la frecuencia del regulador PI que suele ser entre 3 y 5 veces menor a la del filtro de corriente, en este caso es cinco veces menor, 300Hz, lo que son  $600\pi$  radianes.

Para calcular la constante de tiempo ( $t_n$ ) se tiene que imponer un MF (margen de fase) para que el sistema sea estable. En este caso se ha escogido un MF=70°. De esta manera ya se puede proceder a calcular la  $T_n$  mediante los argumentos del lazo abierto.

$$T_n = 3,45 \cdot 10^{-3} \text{ seg.}$$

Una vez calculado la  $T_n$  se puede calcular la  $K_p$ , haciendo que el módulo del lazo sea igual a uno.

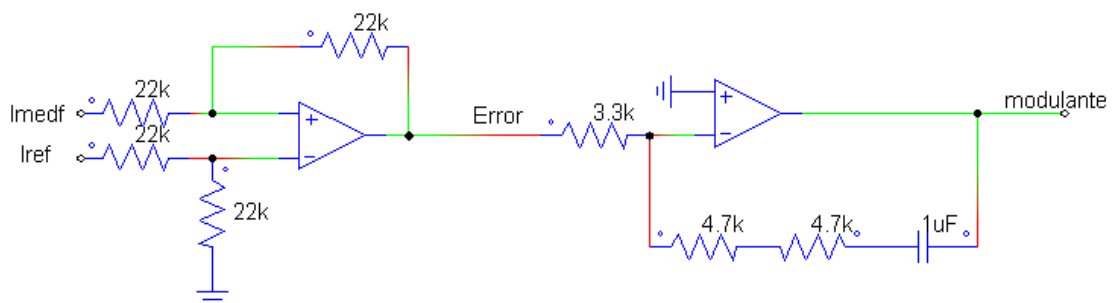
$$K_p = 0,3767$$

Calculados la  $K_p$  y la  $T_n$  solo faltaría implementar estos valores analógicamente en el control. Este paso se realiza mediante amplificadores operacionales, resistencias y condensadores. Los valores de las resistencias y el condensador se calculan a partir de las siguientes fórmulas.

$$K_p = R_2/R_1$$

$$T_n = R_2 C$$

Para calcular los valores se ha impuesto el valor del condensador, que es de  $1\mu\text{F}$ , con esto se han calculado los valores de las resistencias,  $9,4\text{k}\Omega$  para  $R_2$  y  $3,3\text{k}\Omega$  para  $R_1$ . Como la resistencia de  $9,4\text{k}\Omega$  no es estándar, se han colocado dos resistencias de  $4,7\text{k}\Omega$  en serie. En la siguiente imagen se puede ver la resta entre la corriente medida y la de referencia y el PI.



*Resta entre Imedf y Iref y regulador PI*

Una vez realizado el PI solo queda generar la señal de conmutación, esto se hace

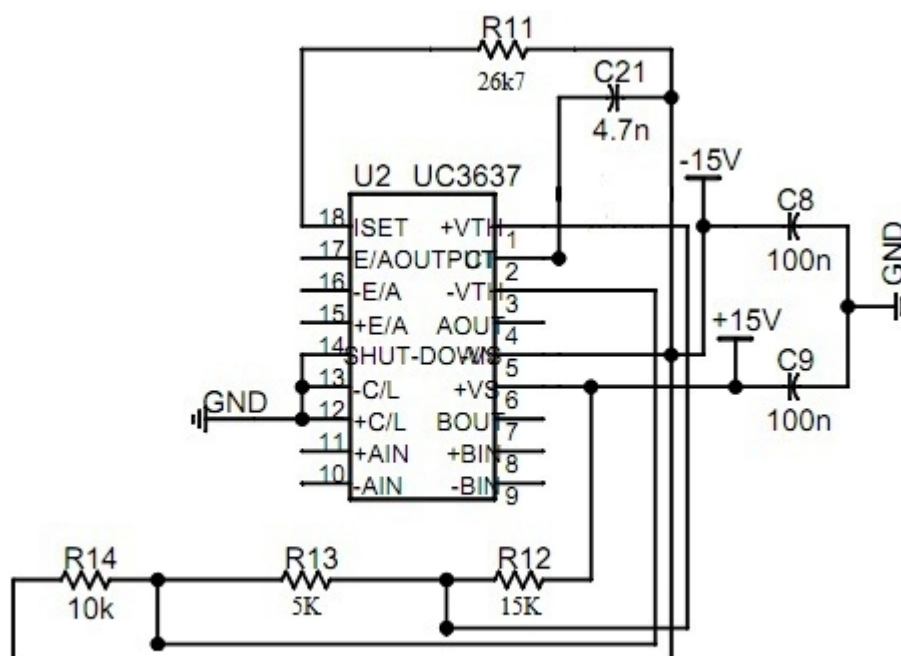
mediante el método de modulación por ancho de pulsos.

#### 4.4.2.4 - Modulación por anchura de pulso

La modulación por ancho de pulsos (PWM) de una señal es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo a partir de una señal periódica y una modulante.

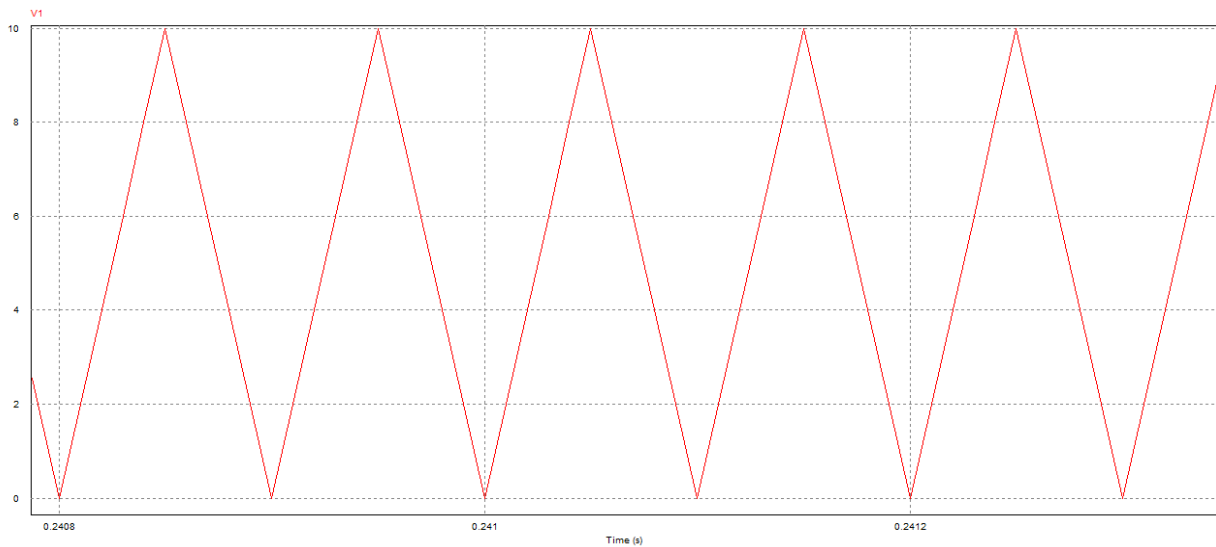
- Señal periódica:

En este convertidor, la señal periódica se obtiene a partir del circuito integrado UC3637N. Este circuito integrado produce una señal triangular de frecuencia y tensión ajustables. En la siguiente imagen se puede ver el circuito electrónico que se monta con el circuito integrado para obtener una tensión triangular de 10KHz y unos valores de tensión comprendidos entre 0V y 10V.



Esquema de conexiones de CI UC3637N

El circuito integrado se alimenta a 15V en la patilla 5 y -15V en la patilla 6, se coloca un condensador en cada patilla, conectado a tierra con el fin de estabilizar la alimentación ante transitorios, estos condensadores son de poliéster de 100nF. Las patillas 12, 13 y 14 se conectan a tierra. El valor de la frecuencia se impone mediante la resistencia R11, de 26,7K $\Omega$  y el condensador C21, de 4,7nF, el cálculo de estos valores se hace mediante unas formulas indicadas por el fabricante. Para indicar los valores de los picos de la triangular se utilizan las resistencias R12, R13 y R14 a modo de divisor de tensión. La resistencia R12 se conecta por un lado a 15V, en su otro lado se conecta a R13 ya la patilla 1, el valor de la tensión en este punto es el valor de la tensión del pico superior de la triangular, 10V. La resistencia R14 se conecta por un lado a -15V, en su otro lado se conecta a R13 ya la patilla 3, el valor de la tensión en este punto es el valor de la tensión del pico inferior de la triangular, -10V. La patilla 2 es la salida de la tensión triangular. En la siguiente imagen se puede ver la tensión triangular.



*Tensión de salida del UC3637N*

- Señal Modulante:

Esta señal denominada modulante se obtiene a partir de la salida del PI. Esta señal oscilará entre 0 y 10V, dependiendo del error entre la corriente de medida y la referencia. Esta señal le indicará al driver el ciclo de trabajo dependiendo del error.

#### 4.4.2.5 - MPPT Maximum power point tracking

Las siglas MPPT, que provienen del inglés, “maximum power point tracking”, significa que es un sistema seguidor del punto de máxima potencia, lo que supone un máximo rendimiento. Este convertidor lleva un MPPT incorporado de manera que aprovecha al máximo la energía del viento.

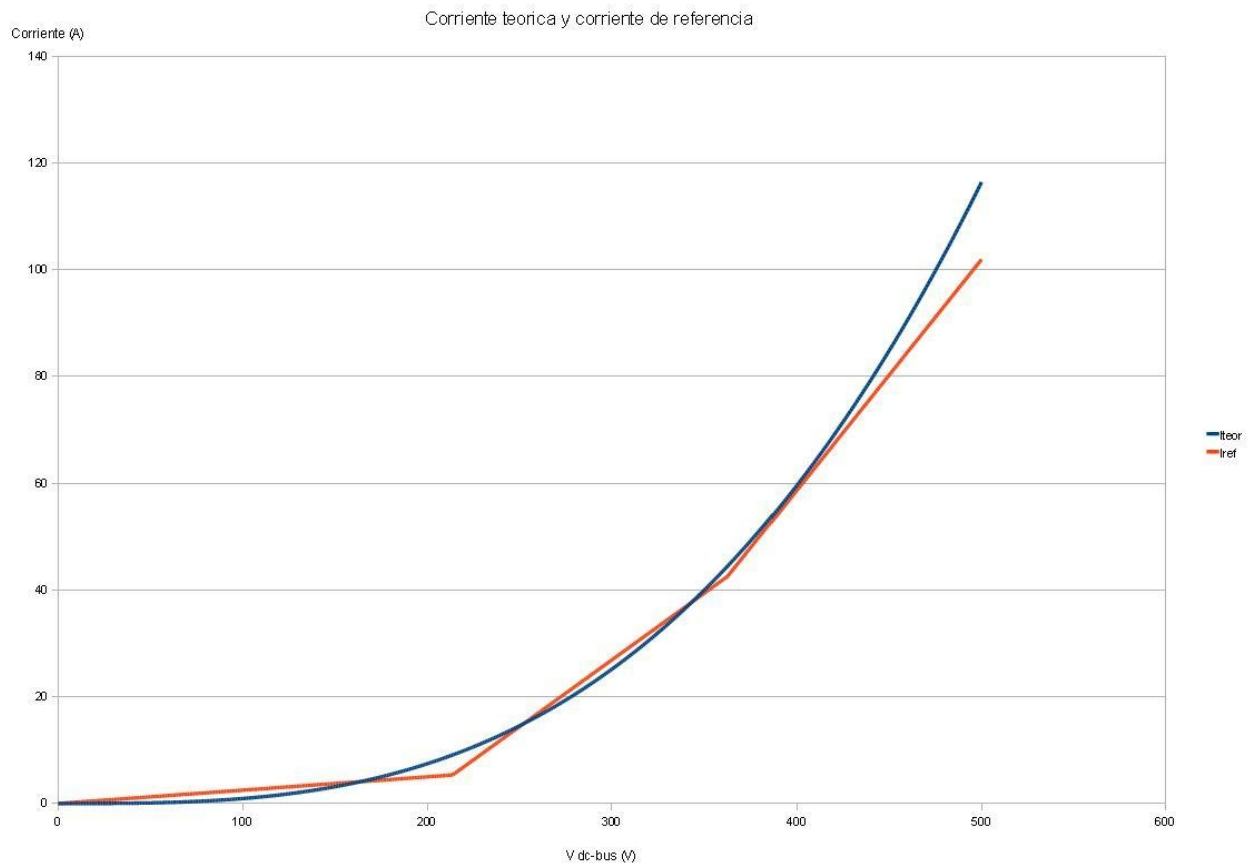
La potencia producida por el aerogenerador, es función del viento, y para que el rendimiento sea máximo, la velocidad de la punta de las palas (TSR) tiene que ser igual a seis. El valor de la tensión del bus de continua es función de la velocidad del generador, por lo que a cada tensión del bus de continua le corresponde una corriente, de modo que a cada velocidad de viento se le asigna una potencia.

La relación entre la tensión del bus de continua y la corriente es una función exponencial. Midiendo el valor de la tensión del bus, se puede hallar una corriente con la que se consigue que el TSR de las palas sea 6 y así el rendimiento sea el máximo. Para cada tensión medida hay que asignar una corriente de referencia mediante un circuito electrónico.

El inconveniente de este método, es que para hacerlo lo más preciso posible, hay que hacer primero un modelado muy exacto del sistema. Como el valor del TSR óptimo no es exacto, ni el valor del rendimiento de las palas tampoco, no se puede hacer un sistema de seguimiento del MPPT exacto. Debido a esto y a la dificultad de implementar el sistema electrónico para generar la corriente de referencia mediante una exponencial, se ha optado por hacer una aproximación

### *Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga*

mediante tres rampas. Las tres se generan de manera independiente, y mediante tres diodos se consigue que pase solo la rampa de mayor valor, generando la corriente de referencia. En la siguiente imagen se puede ver el valor de las tres rampas y el valor de la exponencial.



*Corriente teórica y aproximación por tres rampas*

La realización de las tres rampas se hace mediante amplificadores operacionales. Lo primero que se hace es pasar la señal de la tensión del bus por un seguidor para que no consuma corriente del sensor y mantener la señal con su valor exacto. Después se ramifica la señal por 3 ramas, una para cada rampa, y al final se juntan las tres mediante tres diodos.

- Rampa 1:

Para la primera rama, que genera la rampa 1, se le aplica una ganancia inversora de -0,36, esta ganancia es negativa debido a que las ganancias inferiores a 1 tienen que ser siempre negativas. Después se añade otra ganancia de -1 con otro amplificador operacional. La ecuación de la rampa uno es la siguiente:

$$I_{ref} = 0,18 * V_{med}$$

La ganancia total de la rampa es de 0,36. Este valor es algo más bajo que el del cálculo teórico, se ha hecho de esta manera para que el aerogenerador pueda arrancar con mayor facilidad. Esta rampa da la corriente de referencia entre 0 y 8A, los valores superiores los dan las otras dos rampas

- Rampa 2:

La segunda rampa se genera de forma distinta a la primera, esta rampa tiene una ganancia y una resta. Primero se hace la resta con un amplificador operacional, la tensión que se reste se



regula con un potenciómetro y se pasa por un seguidor, para que absorba corriente del potenciómetro. El valor de la resta es de 4V. Después de la resta se aplica una ganancia de 1,625 mediante otro amplificador operacional, como la ganancia es superior a 1, se puede hacer en un paso, no como en el caso anterior. El motivo de que la resta se haga antes que la ganancia es que si se hace al revés, el primer amplificador se satura y no da bien los valores de corriente de referencia. La ecuación de la segunda rampa es la siguiente:

$$I_{ref} = V_{med} * 1,625 - 6,5$$

Esta rampa da la corriente de referencia para valores de corriente comprendidos entre 8A y 42A, las corrientes más bajas las da la primera rampa y las más altas las da la tercera rampa.

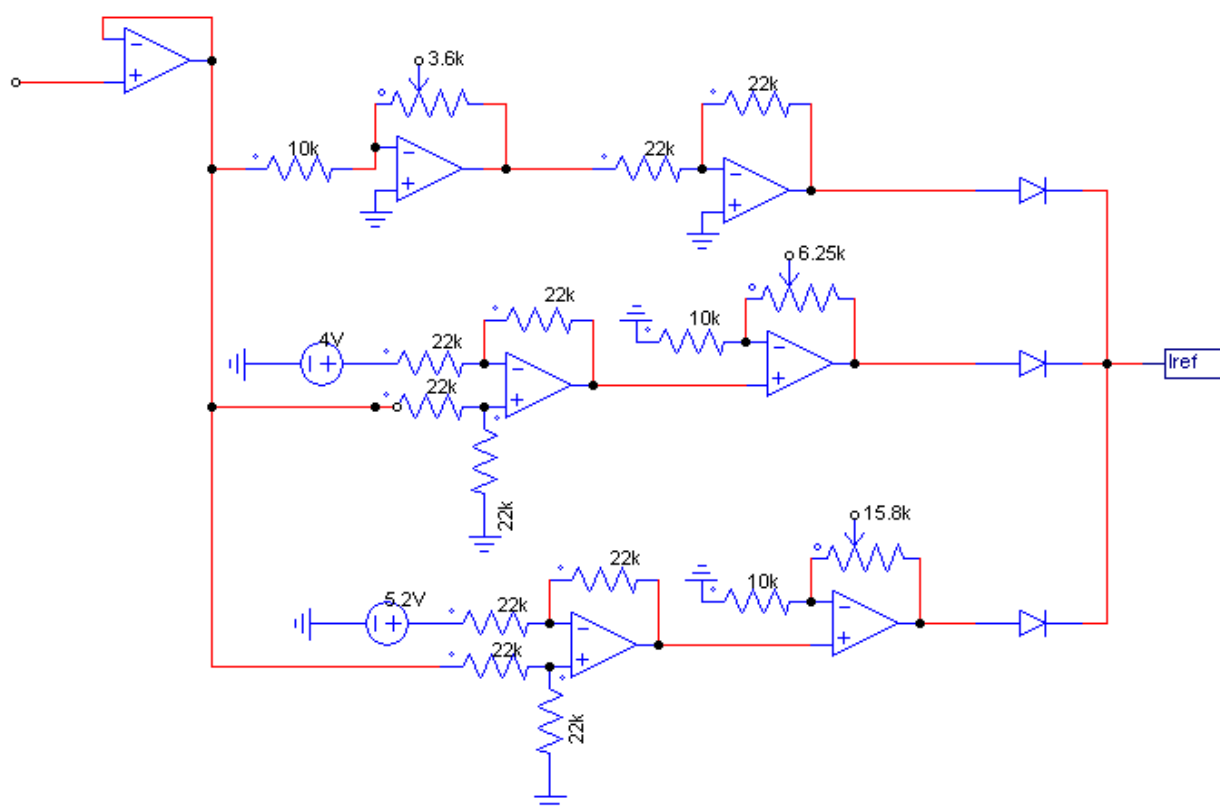
- Rampa3:

La tercera rampa tiene la misma estructura que la segunda, pero como su función es diferente, el valor de la resta y de la ganancia cambian. Primero se hace una resta de 5,2V y después se aplica una ganancia de 2,58. La ecuación de la tercera rampa es la siguiente:

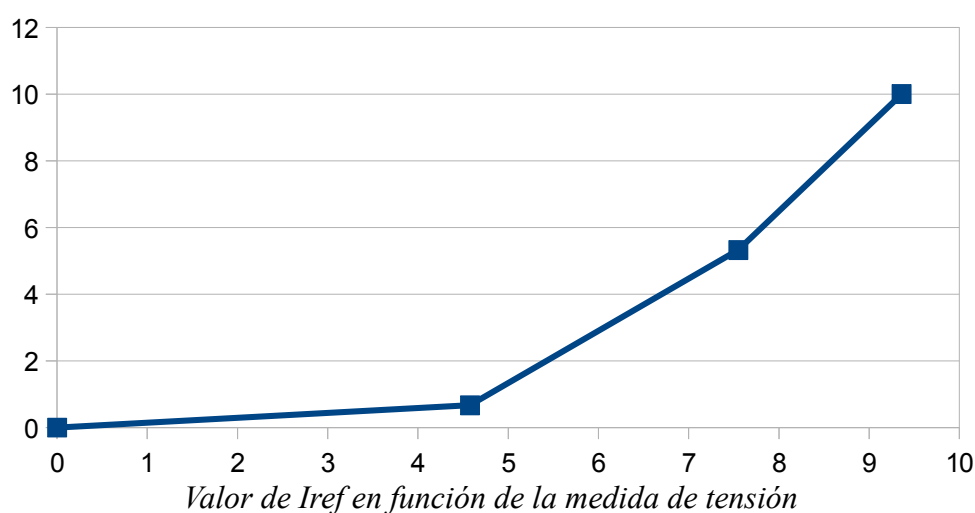
$$I_{ref} = V_{med} * 2,58 - 13,42$$

Esta rampa da la corriente de referencia para valores de corriente comprendidos entre 42 y 80A.

Las señales de las tres rampas pasan por tres diodos y se unen. De esta manera se consigue que la corriente de referencia siempre tenga el mismo valor que la rampa con mayor valor.



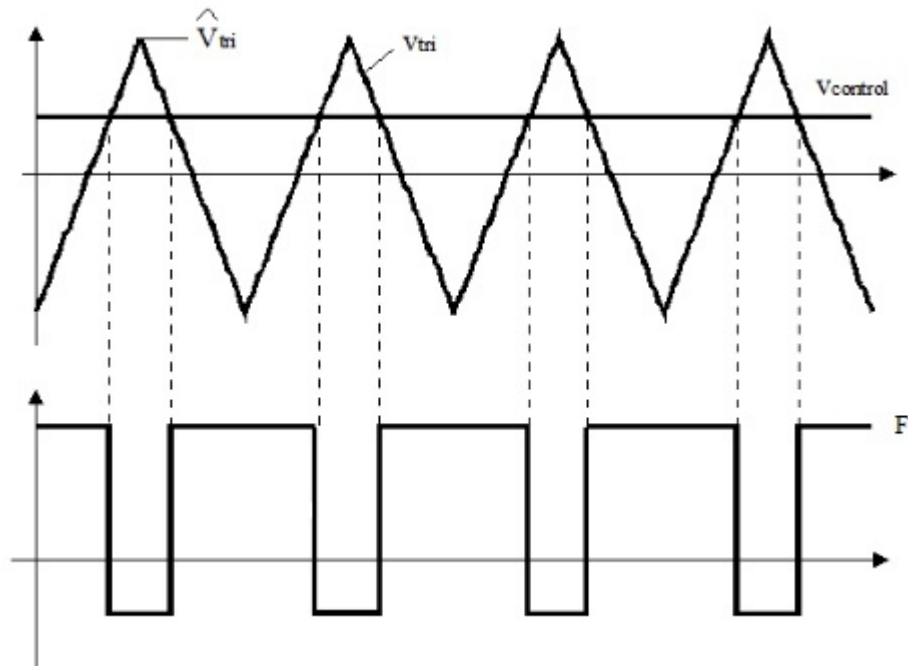
Circuito de obtención de las tres rampas



#### 4.4.2.6 – Obtención de la señal modulante

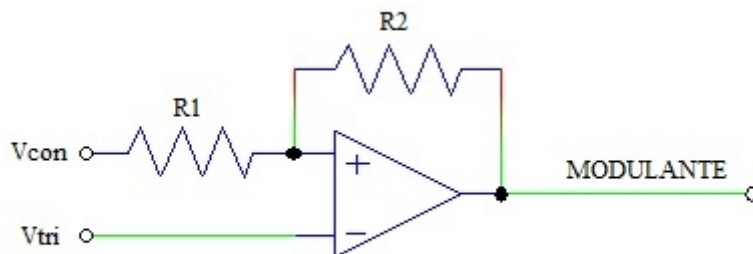
La señal modulante es la que da las ordenes de encendido y apagado del IGBT. Esta señal se genera mediante un comparador. El funcionamiento de un comparador es muy sencillo, este tiene dos entradas, si el valor de la tensión en la pata positiva es superior a la de la negativa, a su salida da una señal positiva, si es al revés, la señal de la salida puede ser de 0V o de valor negativo, según esté configurado el comparador.

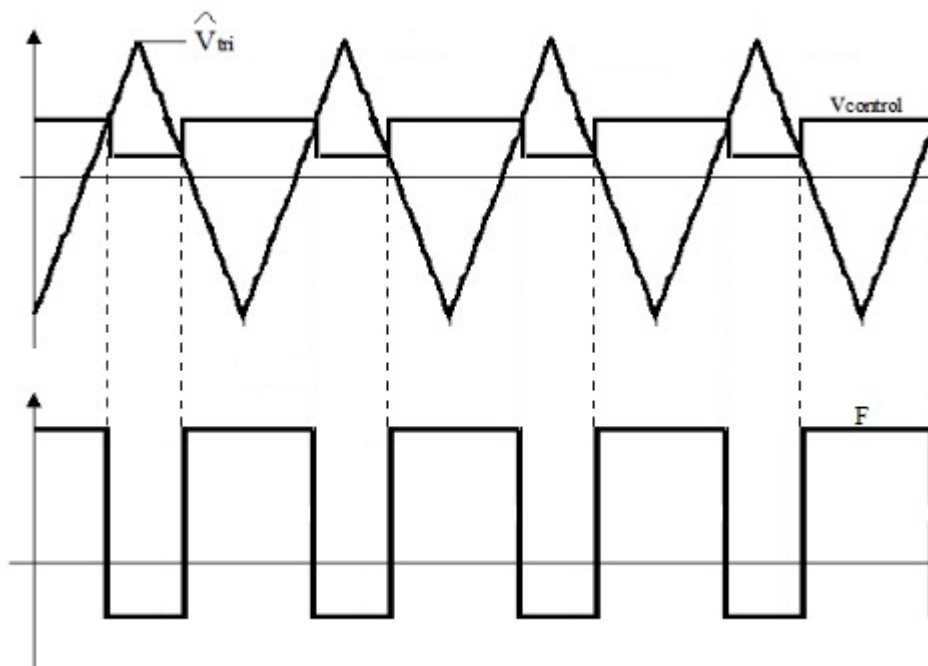
En la patilla positiva del comparador se introduce la señal de la salida del regulador PI y en la patilla negativa la señal triangular, cuanto mayor es la tensión a la salida del pi, mayor es el ciclo de trabajo, de este modo, con la variación de la salida del PI, se controla el ciclo de trabajo, consiguiendo que se pueda controlar la corriente y por consiguiente la potencia. En la siguiente imagen se puede ver el ciclo de trabajo (F) en función del valor de la salida del PI ( $V_{control}$ ).



*Obtención de las ordenes de disparo del IGBT*

Este método tiene un inconveniente, es que si aparecen ruidos tanto en la  $V$  de control o en la señal triangular, en el momento en el que las dos señales se cruzan, pueden producirse varios cruces, haciendo que el IGBT haga varios encendidos y apagados muy rápidos, que se traducen en pérdidas de rendimiento y calentamiento de los semiconductores. Para evitar que esto ocurra se ha implementado una histéresis a la señal de control, de esta manera, cuando se cruzan las dos señales, el valor de la  $V_{con}$  varía un poco, para evitar estos cruces, en las siguientes imágenes se puede ver el circuito de histéresis, con dos resistencias y el resultado en la señal modulante.





*Obtención de las ordenes de disparo del IGBT con histéresis*

Si el valor de las histéresis es muy grande el sistema no puede trabajar a ciclos de trabajo muy altos ni muy bajos, por esto se ha escogido una histéresis del 0,5%. El valor máximo de la modulante es de 10V, por lo que el valor de la variación de la tensión tiene que ser de 0,05V. La tensión de salida del comparador es de 15V, mediante la siguiente formula se ha calculado el valor de las resistencias de la histéresis.

$$V_{sa} * R1 / (R1 + R2) = 0,05$$

Se ha escogido un valor de 100KΩ para R2, y calculando con la formula, el valor de R1 es de 330Ω. Con este valor de histéresis el sistema puede trabajar correctamente en un rango de ciclos de trabajo que va desde el 0,5% hasta el 99,5%.

Esta señal no es capaz de encender y apagar el igbt, por lo que hay que colocar un driver para que a partir de esta señal encienda y apague el igbt.

## 4.5 – Driver

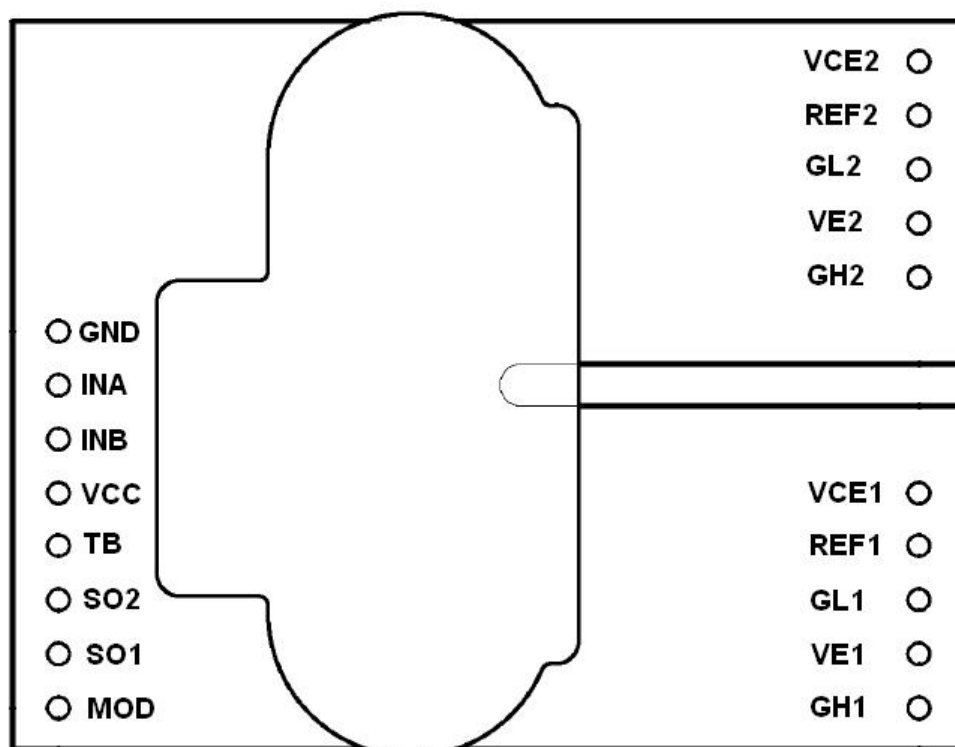
Un driver es un dispositivo que sirve para acondicionar señales. El circuito de control genera una señal de encendido y apagado para el IGBT, esta señal tiene unos valores de 0 y 15V, que están referidos al neutro de las baterías. El IGBT necesita para encenderse una tensión entre puerta y emisor con valores entre 5V y 20V, para el apagado necesita unos valores entre -5V y -20V.

Para poder encender el igbt se ha optado por el uso de un driver comercial, se ha escogido un driver fabricado por CONCEPT, el modelo es 2SC0108T2A0-17. El driver sirve para accionar dos IGBTs al mismo tiempo, como solo se necesita un canal, se han preparado los dos canales de la misma manera, así, si un canal del driver se estropea, se puede utilizar el otro. En los próximos

apartados se describe el funcionamiento del driver y el diseño del circuito que lleva unido.

#### 4.5.1 – Estructura del driver

El driver tiene 18 pines de conexión, 8 para la entrada y 5 para cada salida. En la siguiente imagen se muestra su estructura.



*Esquema del driver*

Pines de entrada:

- GND: Tierra del driver.
- INA: Entrada de señal para el canal 1.
- INB: Entrada de señal para el canal 1.
- VCC: Tensión de alimentación.

- SO2: Salida del estado del canal 2.
- SO1: Salida del estado del canal 1.
- MOD: Selección de modo.

Pines de salida:

- VCE: Conexión al colector.
- REF: Resistencia de referencia.
- GL: Conexión a la puerta para apagado.
- VE: Conexión al emisor.
- GH: Conexión a la puerta para encendido.

Los valores principales de funcionamiento del driver son los siguientes:

- VCC: De 0 a 16V, normalmente 15V.
- Nivel lógico de entrada desde -0,5V hasta VCC+0,5V
- Corriente de puerta entre 8 y -8V
- tensión entre puerta y emisor de 15V para encendido y -8V para apagado.
- Tiempo de respuesta ante cortocircuito de 1,2 micro segundos.

Hay más valores importantes para el funcionamiento del driver que se explican en los siguientes apartados.

## **4.5.2 – Funcionamiento del driver**



Para explicar el funcionamiento del driver se muestra el diagrama de bloques del mismo en la siguiente imagen:

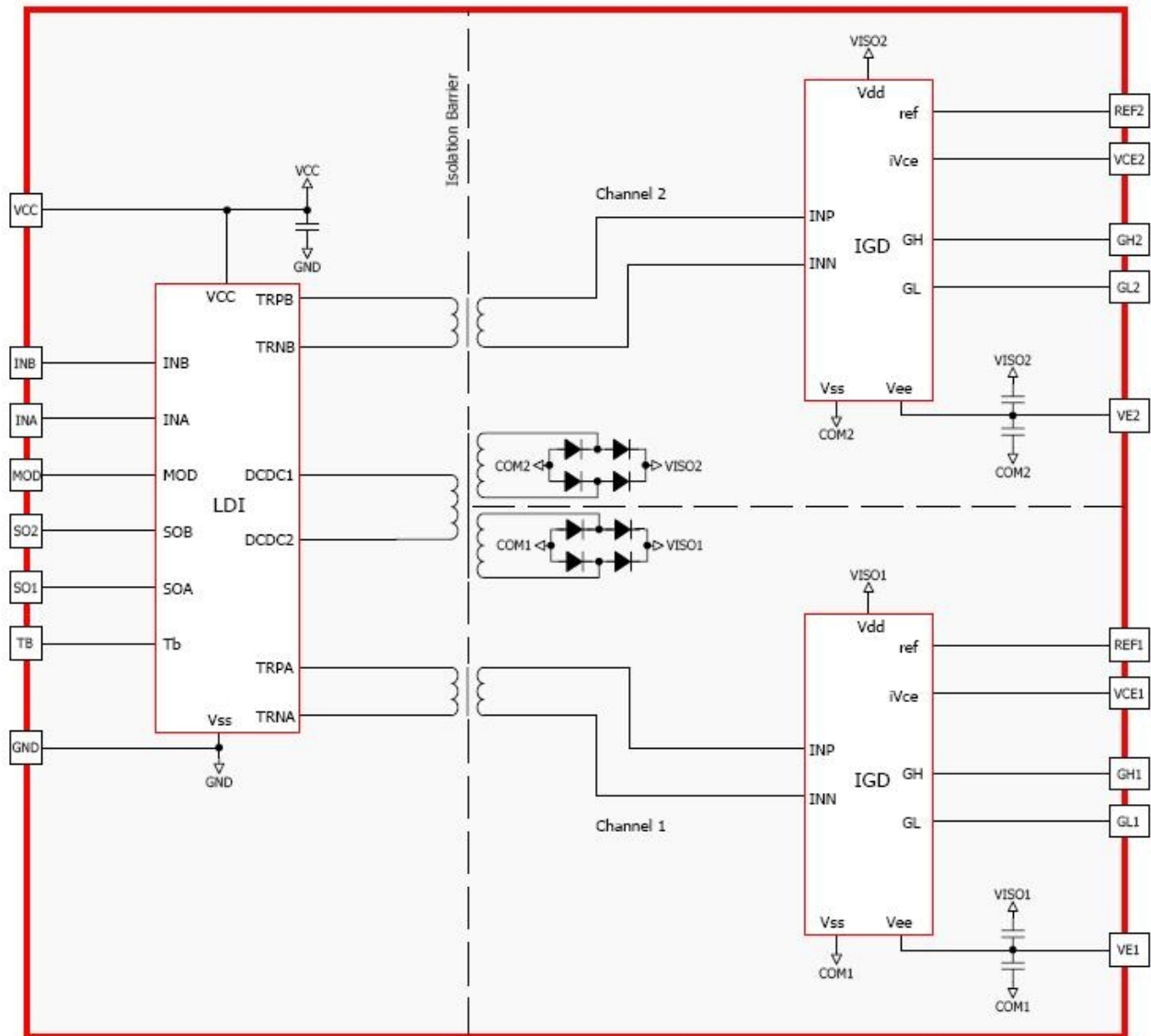


Diagrama de bloques del driver

La etapa LDI (Logic to Driver Interface) actúa con los disparos enviados por el circuito de control, procesando su información para enviarlos a los dos transformadores de pulsos correspondientes con cada canal de salida. El transformador de pulsos brinda aislamiento galvánico entre el circuito electrónico y el de potencia del driver. A la vez, se utiliza para enviar en dirección contraria la información de estado de cada canal al LDI cuyas principales funciones son:

- Creación de los niveles lógicos de los disparos de salida a partir de las señales de entrada. Esto se realiza con un comparador tipo Schmitt.
- Obtención de los tiempos muertos en el funcionamiento en medio puente.

- Codificación de las señales de disparo para ser transmitidas a través del transformador de pulsos.
- Evaluación de la información de estado recibida de los canales del driver que se procesa y se envía como una señal lógica reconocida por el usuario.

La etapa IGD (Intelligent Gate Driver) de la figura 2.70 recibe la información de los disparos que vienen del transformador de pulsos para reconstruir su forma original y amplificarlos. Estos disparos encienden y apagan el semiconductor introduciendo una corriente de puerta de varios amperios. Además la IGD presenta funciones de protección que evitan un funcionamiento del semiconductor con valores de operación peligrosos. Las funciones principales de la IGD son:

- Decodificación de las señales de disparo recibidas desde el transformador.
- Amplificación de las señales de disparo a los valores del semiconductor.
- Protecciones contra sobrecargas y cortocircuitos del semiconductor.
- Control de baja alimentación de los disparos del driver.
- Generación de los tiempos de respuesta y bloqueo. El tiempo de respuesta transcurre desde que se envía la orden de encendido hasta que el semiconductor llega al estado de saturación. El tiempo de bloqueo transcurre desde que se activa cualquier protección y su duración depende del tiempo en que se encuentren activadas dichas protecciones. Durante este tiempo los canales del driver no aceptan ninguna señal de disparo.
- Envío de la información del estado de los canales de salida al LDI.

A continuación se detallan las protecciones de la IGD:

- El control de baja alimentación mide el valor de las tensiones de disparo de los IGBTs para asegurar su funcionamiento en saturación. Si detecta una tensión menor de la de saturación del IGBT, aplica una tensión negativa en la puerta del driver para apagarlo.
- La protección de sobrecorriente implementada con la resistencia  $R_{th}$  mide la tensión colector-emisor. El valor de  $V_{th}$  fijado con  $R_{th}$  es el umbral de activación de la protección que permanece inactivo en el tiempo de respuesta.
- Después de la activación de cualquier protección, en particular la de sobrecorriente, existe el tiempo de bloqueo para enfriar el semiconductor.
- En el momento que se activa la protección de baja alimentación o la de sobrecorriente se inicia el tiempo de bloqueo y en el siguiente flanco del disparo del semiconductor se envía la señal de error de la IGD al LDI. El LDI memoriza este error y lo envía al estado de salida del canal correspondiente cuya señal se pone a nivel bajo.

### **4.5.3 – Configuraciones del driver**

El driver Concept se puede configurar sus dos canales de dos maneras distintas para distintos funcionamiento. Esta configuraciones pueden ser modo directo o medio puente. En los

siguientes apartados se explican de manera más detallada las dos configuraciones.

#### **4.5.3.1 – Modo directo**

En esta configuración los dos canales del driver son independientes. Cada señal de entrada influye únicamente en su canal, por lo que pueden estar los dos IGBTs encendidos o apagados a la vez. Esta configuración se puede utilizar en bloques de conmutación donde el regulador de los pulsos con los tiempos muertos incluidos. En el caso del convertidor utilizado en este proyecto se ha utilizado este modo debido a que solo hace falta un canal del driver, pero para poder aprovechar los dos canales se han puesto en este modo y se ha conectado la misma señal de entrada a ambos canales, así, si un canal del driver se estropea, se puede conectar el IGBT al otro canal.

Para que el driver trabaje en configuración de modo directo hay que conectar el terminal MOD a tierra.

#### **4.5A.3.2 – Modo de medio puente**

Este modo sirve para controlar los dos igbts de un bloque de conmutación. En un bloque de conmutación nunca puede haber dos semiconductores encendidos o apagados a la vez. El driver genera los tiempos muertos de cada apagado, la duración de estos tiempos muertos puede durar entre 0,5 y 3,8 microsegundos.

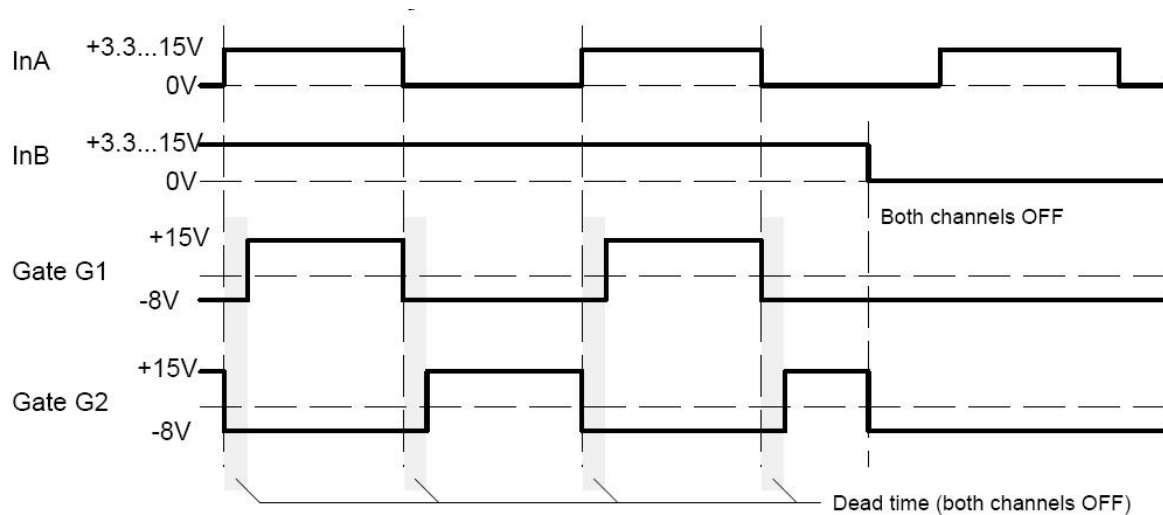
La duración de los tiempos muertos se ajusta con una resistencia ( $R_m$ ) conectada entre el terminal MOD del driver y tierra. Es recomendable colocar también un condensador de 22nF en paralelo con la resistencia para conseguir más exactitud en la duración de los tiempos muertos. El valor de la resistencia tiene que estar entre 73k $\Omega$  y 182k $\Omega$ . La siguiente formula sirve para calcular el valor de la resistencia para un tiempo muerto dado:

$$R_m = 33 * T_d + 56,4$$

$T_d$ =Tiempo muerto en  $\mu s$

$R_m$  en K $\Omega$

En la siguiente imagen se pueden ver las ordenes de encendido y apagado de cada IGBT en función de las entradas para una configuración en medio puente.



*Señales del driver en configuración de medio puente*

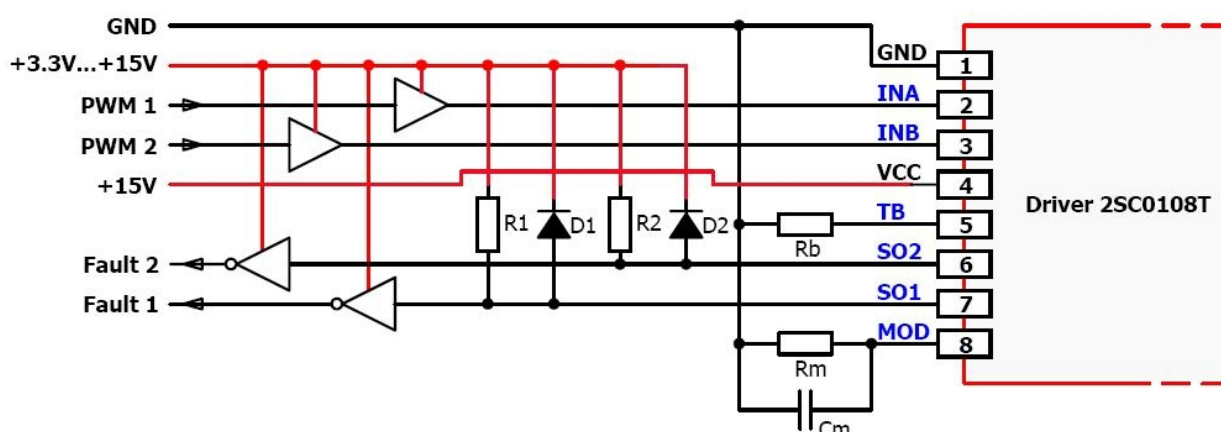
Cuando en la segunda entrada (INB) la tensión está entre 3.3V y 15V el driver entra en funcionamiento, cuando la tensión es cero, el driver apaga los dos IGBT. Las conmutaciones de los dos IGBTs se hacen según la señal de la primera entrada (INA). La primera salida conmuta igual que la señal de entrada y la segunda salida lo hace a la inversa, el driver incluye unos tiempos muertos en la conmutación para evitar que los dos IGBTs estén encendidos a la vez y se produzca un cortocircuito.

#### 4.5.4 - Configuración de los pines del driver

A continuación se detalla la configuración de cada pin del driver. Primero se explican los pines de entrada y después los de salida.

##### 4.5.4.1 – Pines de entrada

En la siguiente imagen se puede ver la configuración de los pines de entrada recomendada por el fabricante:

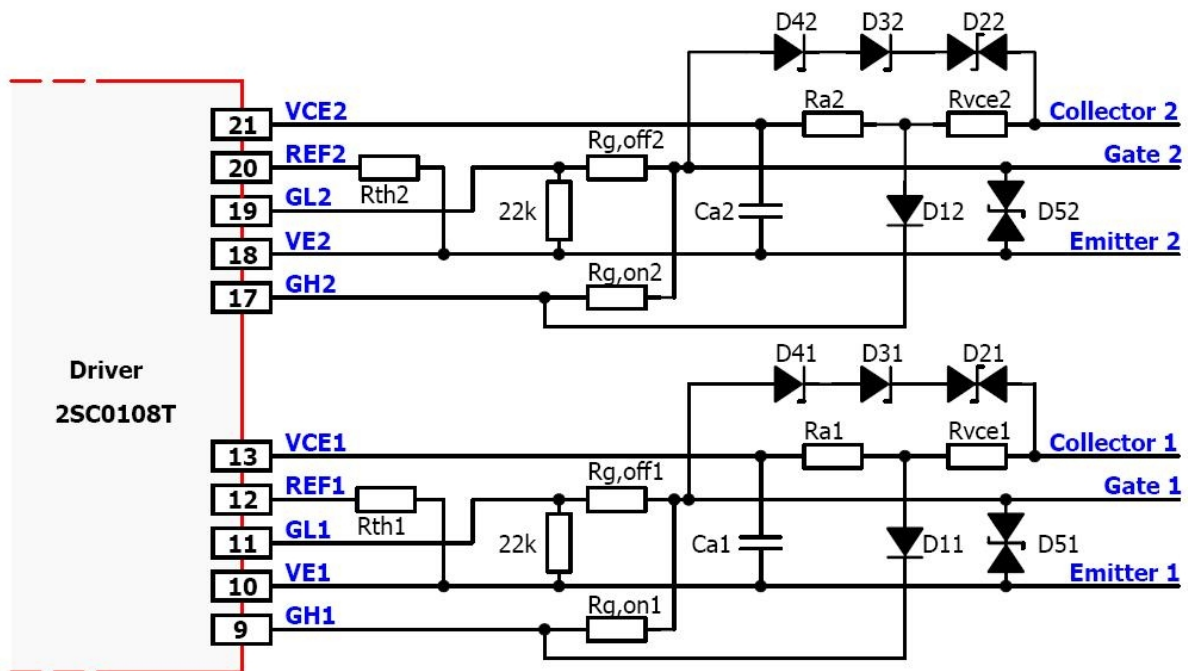


Configuración de los pines de entrada

- GND: Es el pin del negativo de la alimentación, hay que conectarlo a 0V.
- INA: Es la entrada de la señal de conmutación para el primer canal, El valor de la señal lógica de encendido tiene que ser entre 3,3V y 15V.
- INB: Es la entrada de la señal de conmutación para el segundo canal, El valor de la señal lógica de encendido tiene que ser entre 3,3V y 15V. En modo de medio puente, sirve para encender o apagar el driver.
- VCC: Es el pin de la alimentación, hay que conectarle una tensión de 15V respecto a GND. Es recomendable conectar dos condensadores, uno electrolítico de 100 $\mu$ F y otro de poliéster de 1 $\mu$ F, para conseguir que la tensión en el driver sea más estable.
- TB: Es el pin que sirve para ajustar el tiempo de bloqueo. Cuando hay un error, el driver apaga los dos igbts durante el tiempo de Tb, así, si se produce un cortocircuito, el tiempo de bloqueo le da tiempo para que se enfríe un poco el semiconductor.
- SO1 y SO2: Son las salidas de estado de cada canal. Hay que alimentarlas a la misma tensión que la señal, si la tensión es distinta el driver detecta un error y no funciona. La salida de estado funciona de manera que cuando hay un error, se conecta a 0V, y cuando no hay ningún error, la patilla esta a un tensión de 4V. Para evitar que cuando haya un error la corriente por las patillas del estado hay que poner una resistencia entre la patilla y su alimentación, para limitar la corriente a un máximo de 20mA. Cuando se trabaja con una lógica de 3.3V hay que colocar un diodo schottky en paralelo con la resistencia.
- MOD: Es la patilla que sirve para escoger el modo de trabajo del driver. Si se conecta directamente a tierra se trabaja en modo directo. Para trabajar en modo de medio puente hay que poner una resistencia y un condensador en paralelo entre las patillas MOD y GND, el condensador tiene que ser de 22nF y la resistencia tiene que estar entre 73k $\Omega$  y 182k $\Omega$ , el valor de la resistencia hará que el tiempo de bloqueo sea mayor o menor.

#### 4.5.4.2 – Pines de salida

El driver tiene dos salidas idénticas, cada una con 5 pines. El fabricante da distintas configuraciones, en este apartado solo se explicara uno de ellos ya que es el que recomienda el fabricante y es el que se ha utilizado. En la siguiente imagen se puede ver la configuración.



### Configuración de los pines de salida

- **VCE:** Es la pata que hay que conectar al colector. Las resistencias  $R_{ax}$  y  $R_{vcex}$  y los diodos D4X D3X y D2X sirven para proteger el IGBT de sobretensiones, cuando entre el colector y el emisor aparece una tensión cercana a la de aislamiento del IGBT, estos diodos provocan encendidos muy rápidos del IGBT, que duran lo mismo que la sobretensión. Con esto se consigue proteger el IGBT ante sobretensiones, esta protección es muy importante debido a que estos componentes son muy sensibles a las sobretensiones.
- **REF:** Entre este pin y el pin del emisor se conecta la resistencia  $R_{thx}$ . Esta resistencia tiene que estar conectada lo más cerca posible del driver. Este pin sirve para proteger el IGBT ante sobrecorrientes y cortocircuitos. La pata REF tiene una fuente de corriente de de 150mA, con la resistencia  $R_{thx}$  se consigue en el pin REF una tensión, esta tensión tiene que ser mayor que la tensión umbral ( $V_{th}$ ) del igbt. Durante el encendido del IGBT, si la tensión entre colector-emisor es mayor que la tensión de referencia, el driver detecta un error debido a una sobrecorriente o un cortocircuito y apaga el IGBT.
- **GL:** Es el pin de apagado de puerta. Se conecta a la resistencia de puerta y después a la



puerta del IGBT. Este pin es solo para el apagado, para el encendido está el pin GH. La ventaja de tener dos pines para encendido y apagado es que se puede hacer cada uno con un valor de resistencia distinto, ya sea porque el IGBT necesita dos resistencias distintas para encenderse y apagarse o porque se quieran hacer a distinta velocidad porque la aplicación en la que se usan así lo requiera.

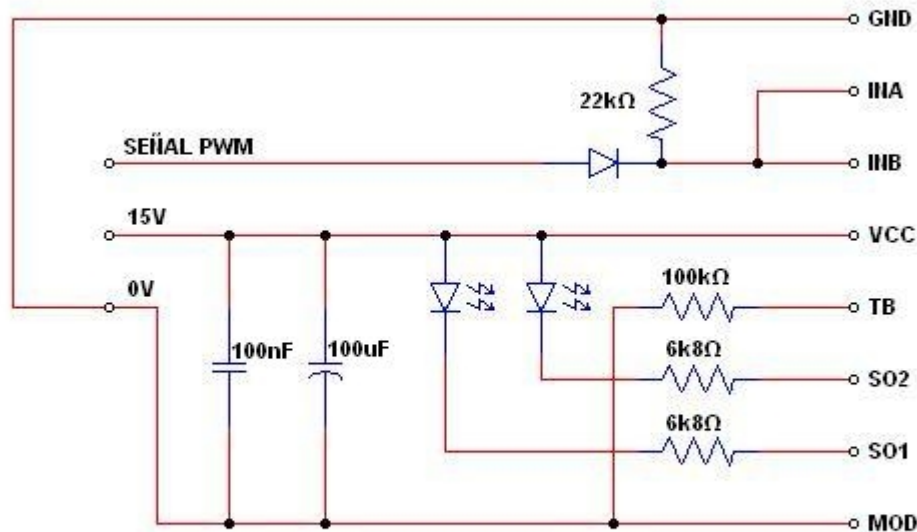
- VE: Es el pin que se conecta a la puerta del emisor. Hay que conectarle la resistencia  $R_{thx}$  lo más cerca posible para obtener la tensión de referencia para la protección contra sobrecorrientes y cortocircuitos.
- GH: Es el pin de encendido de la puerta. Funciona igual que el pin GL, pero en vez de ser para apagado es para el encendido del IGBT.

### **4.5.5 - Circuito del driver**

A continuación se muestra la configuración que tiene el circuito del driver. Se explica de forma separada la entrada y la salida. El driver está alojado en una placa aparte del control. La placa está colocada al lado del IGBT, para que el cable que une el driver y el IGBT sea lo más corto posible.

#### **4.5.5.1 – Pines de entrada**

En la siguiente imagen se puede ver la configuración de la entrada del driver.



*Circuito de entrada del driver*

La alimentación del driver se hace a 15V. Se han colocado dos condensadores entre 0V y 15V, con el fin de que la tensión en el driver sea más estable. El primer condensador es un condensador rápido de poliéster de 100nF, el segundo condensador es electrolítico de 100μF, este es más lento, pero tiene más energía.

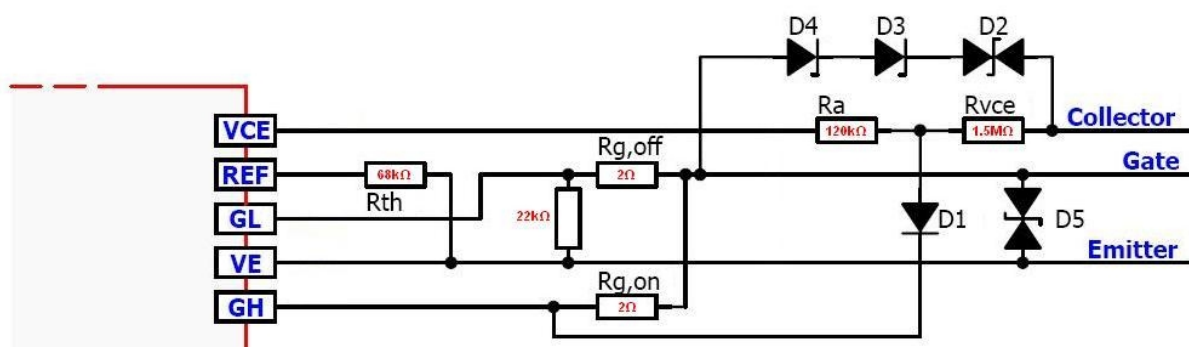
La señal de entrada que llega al driver es de 15V y -15V para encendido y apagado respectivamente. Como los valores deben estar entre 0 y 15V, se ha colocado un diodo y una resistencia grande, para que cuando el diodo no conduce, la pata de la señal esté a 0V.

La alimentación de las señales de estado tiene que tener el mismo valor que la señal de encendido, en este caso 15V. Se ha colocado un diodo led en cada canal y una resistencia, la resistencia sirve para limitar la corriente tanto en el diodo led como en el canal de estado. La corriente que circula es de 2.2mA, que enciende el diodo led, sin sobrepasar su corriente máxima ni tampoco la del canal de estado (20mA).

El pin MOD se ha conectado a tierra para trabajar en modo directo. La resistencia que hay entre TB y tierra hace que el driver tenga un tiempo de bloqueo de 49ms. Cuando el driver detecta un error, este apaga los IGBTs, una vez desaparece el error el driver espera 49ms para volver a poner en marcha los IGBTs.

#### 4.5.5.2 - Pines de salida

En la siguiente imagen se puede ver el circuito de salida del driver para un canal. Los dos canales llevan el mismo circuito, aunque solo es necesario uno de los canales, los dos canales están preparados para trabajar, así, si se estropea uno de los canales, se puede utilizar el otro canal, sin que haga falta comprar un driver nuevo.



*Circuito de salida del driver*

La resistencia  $R_{th}$  sirve para proteger el IGBT de cortocircuitos, se puede poner de manera que también proteja de sobrecorrientes, pero el fabricante recomienda su uso solo para protegerlo de cortocircuitos.

Las resistencias  $R_g$  sirven para limitar la corriente de encendido y apagado del IGBT, en este caso son las dos iguales, de  $2\ \Omega$  como recomienda el fabricante del IGBT. La resistencia de  $22\text{K}\Omega$  que está situada entre la puerta y el emisor sirve para evitar que el driver se encienda solo cuando no el driver está apagado. Si no se pone esta resistencia, cualquier ruido que entra en los cables es suficiente para encender el IGBT.

Para las resistencias  $R_a$  y  $R_{vce}$ , el fabricante recomienda unos valores. Para  $R_a$  el valor recomendado es de  $120\text{K}\Omega$  para IGBTs de  $1200\text{V}$ . El valor de  $R_{vce}$  puede ser variable, entre  $1,2\text{M}\Omega$  y  $1,8\text{M}\Omega$ , para limitar la corriente entre  $0,6$  y  $0,8\text{mA}$ . En este caso se ha seleccionado una resistencia de  $1,5\text{M}\Omega$ , que dejara pasar una corriente de  $0,8\text{mA}$ .

Cuando el IGBT está apagado, circula una corriente que como máximo es de  $0,8\text{mA}$  por el diodo  $D_1$  al pin de la resistencia de encendido. Esta corriente le sirve al driver de modo de protección, si cuando da la orden de apagado el IGBT no se apaga, no circulara corriente por el diodo y el driver dará una señal de error.

Los diodos de la rama superior ( $D_2$ ,  $D_3$  y  $D_4$ ) sirven para proteger el IGBT de sobretensiones. Son diodos especiales para suprimir sobretensiones y soportan mucha potencia durante muy poco tiempo. Para cada tensión de aislamiento de driver, la configuración de estos diodos es distinta, en el caso de un IGBT de  $1200\text{V}$ , el fabricante recomienda colocar seis diodos con una tensión de  $150\text{V}$ , aportando un aislamiento total de  $900\text{V}$ , cinco de estos diodos son unidireccionales y el sexto es bidireccional. Se han colocado los diodos que recomienda el

fabricante, los modelos son TVS P6SMBJ188A-E3 y TVS P6SMBJ188CA-E3 de Vishay. Cuando la tensión entre colector-emisor supera los 900V, los diodos empiezan a conducir, abriendo parcialmente el igbt, este se apaga de nuevo cuando la tensión baje de los 900V. Con esto se consigue proteger el igbt contra sobretensiones.

Entre la puerta y el emisor aparece el diodo 5, en la construcción practica se han colocado dos diodos zener en serie, uno contra el otro, de un valor de 18V. Con esto lo que se consigue es proteger el la puerta contra sobretensiones. Una tensión superior a 20V entre la puerta y el emisor estropea el IGBT, los diodos zener evitan esta sobretensión limitando la tensión en la puerta a 18V.

## **4.6 – Protecciones**

En un aerogenerador los sistemas de protección son más importantes que ninguna otra cuestión, ya que en caso de que ocurra algún error, si el aerogenerador se embala o si el circuito electrónico se sobrecalienta demasiado el resultado puede ser fatídico.

En apartados anteriores se han descrito varios sistemas de protección, como puede ser la veleta desorientadora, los sistemas de protección que se definen en este apartado son todos electrónicos. Recogen señales de distintos sensores y las procesan en una placa de PCB desde donde se dan las ordenes de encendido y apagado de los sistemas de protección.

A continuación se describen las distintas medidas de protección que se han tomado para distintos factores que pueden ser peligrosos en un aerogenerador.

### **4.6.1 – Medidas de protección**

Ante distintos fallos que se puedan generar tanto en el aerogenerador como en el convertidor hay dos medidas de protección para proteger el sistema.

#### **4.6.1.1 – Refrigeración**

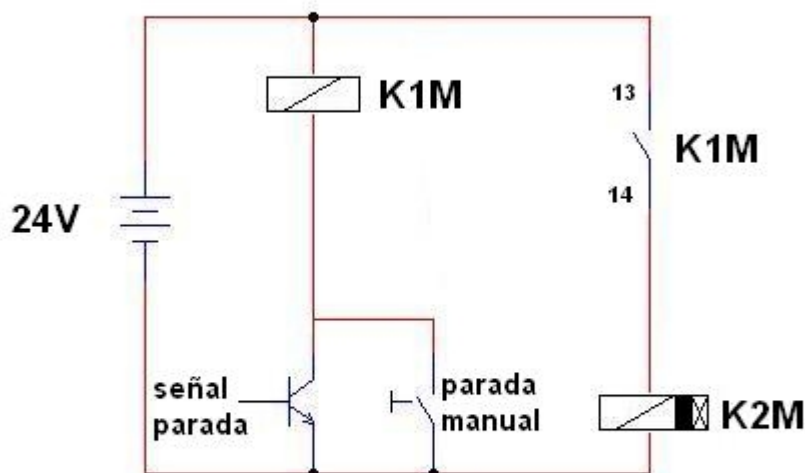
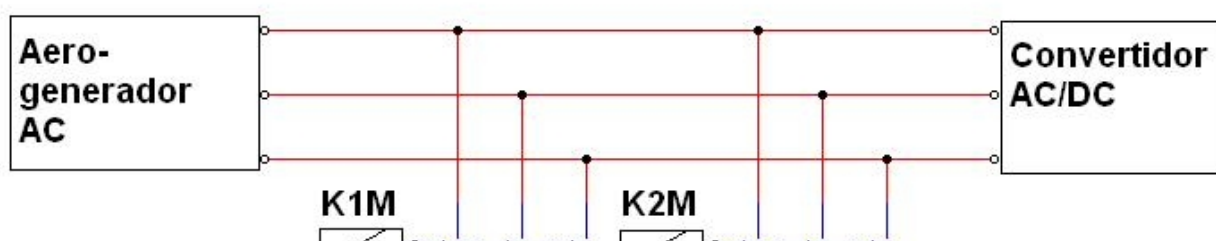
Se ha instalado un sistema de refrigeración para evitar que los componentes electrónicos se calienten demasiado. Cuando estos se calientan, se encienden dos ventiladores en el armario donde está alojada la electrónica. El primer ventilador empuja el aire del exterior hacia dentro, haciéndolo circular por el radiador donde se alojan los semiconductores. El segundo ventilador está situado en la parte superior de armario, donde el aire es más caliente y lo empuja hacia el exterior.

#### 4.6.1.2 – Parada del aerogenerador

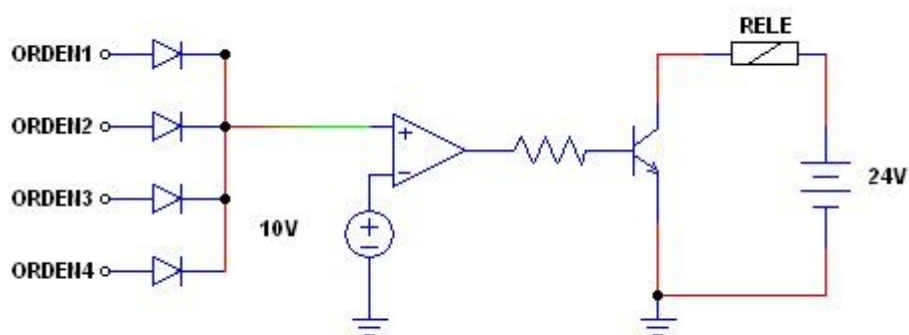
Cuando el sistema de protección detecta un error o las baterías están cargadas, se activa un sistema de parada del aerogenerador. Este sistema se basa en que si a las palas del aerogenerador se les pide una potencia muy grande, estas salen de su régimen aerodinámico y el par que generan es casi nulo, pudiendo llegar a parar el molino. Si el motor se cortocircuita, el par que tiene el motor es muy grande, debido a que la tensión generada es función de la velocidad y al estar cortocircuitado, el valor de la tensión es casi cero, por lo que las palas no giran.

Para que la parada no sea muy brusca y termine rompiendo el aerogenerador, esta se hace en dos pasos, mediante dos relés y dos temporizadores multifunción, se activa primero una carga resistiva de 4KW, que si se suma a la carga que pide el convertidor puede llegar hasta 8KW. Esta carga resistiva hace que el molino reduzca su velocidad, 45 segundos más tarde, un temporizador multifunción hace que se cortocircuite el motor, parándolo del todo. Si el error persiste, el aerogenerador sigue parado, una vez de que el error desaparece, el segundo temporizador multifunción mantiene el aerogenerador parado durante 20 minutos más, esto es por si al poner el aerogenerador en marcha de nuevo se repite el error, evitar que el aerogenerador este continuamente arrancando y parando, ya que la fatiga que sufriría el aerogenerador sería mayor y el generador podría llegar a calentarse demasiado.

En las siguientes imágenes se muestran los esquemas de fuerza y mando del sistema de parada:



La parada se puede activar por distintos sistemas de protección, para no tener que poner un transistor para cada uno de ellos se ha adoptado la siguiente solución: Cada sistema de protección da una señal de 15V para el error y 0V o -15V para el funcionamiento correcto, se ha colocado un diodo a la salida de cada señal, y todos estos se han unido en la entrada de un comparador que enciende un MOSFET, que a su vez activa el relé, si una de las ordenes es de apagado, el molino se parará, para que funcione, todas las ordenes tienen que ser de marcha. También se ha acoplado un interruptor con llave en paralelo con el MOSFET, este interruptor sirve para parar el molino manualmente. Cuando se quita la llave del interruptor, este ya no puede abrirse hasta que no se vuelve a poner la llave, este interruptor está pensado para poder bloquear el aerogenerador para hacer cualquier labor de mantenimiento, y que nadie pueda ponerlo en marcha mientras se trabaja en el. En la siguiente imagen se puede ver el esquema eléctrico de las ordenes de parada.



Ordenes de parada del aerogenerador

#### 4.6.2 – Protección contra embalamiento

El embalamiento consiste en que la velocidad del rotor del aerogenerador aumenta demasiado. Cuanto mayor sea la velocidad de giro, mayor es la fuerza centrífuga que sufren las palas. Si el aerogenerador se embala demasiado, las palas pueden romperse debido a la fuerza centrífuga. Para que esto no ocurra hay que evitar que la velocidad de rotación no sea nunca mayor al producto de la división de 2000 por el diámetro.

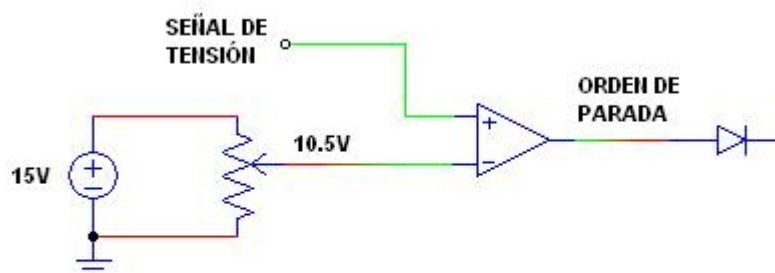
$$n_{\max} = 2000/D$$

Siendo D en metros y la velocidad de rotación en rpm.

En el caso del aerogenerador construido en este proyecto, el valor máximo de la velocidad de rotación es de 475 rpm. El Convertidor no tiene ningún sensor de velocidad, pero como la tensión es proporcional a la velocidad, esta se puede estimar. El convertidor genera hasta una tensión rectificada de 450V. Cuando la tensión del bus de continua llega a 500V significa que el aerogenerador ya va más rápido de lo que debe, por lo que se activa la protección, que da una orden de parada, esto ocurre a una velocidad aproximada de 300rpm.



Cuando se activa la protección de parada, primero se conecta una carga resistiva que frena el aerogenerador, si el error desaparece antes de que se active el cortocircuito, el molino no se para y sigue generando. Así, si el embalamiento se produce debido a una ráfaga de viento más fuerte, la carga frena el molino pero no lo llega a parar, aprovechando mejor el recurso eólico. Si el embalamiento se debe a un error en el convertidor, que hace que extraiga menos potencia de la que debe del molino o si se queda en circuito abierto, la carga resistiva no frenará demasiado el aerogenerador y entrará el cortocircuito, parándolo del todo. En la siguiente imagen se puede ver el esquema electrónico de la protección.



#### *Orden de parada por embalamiento*

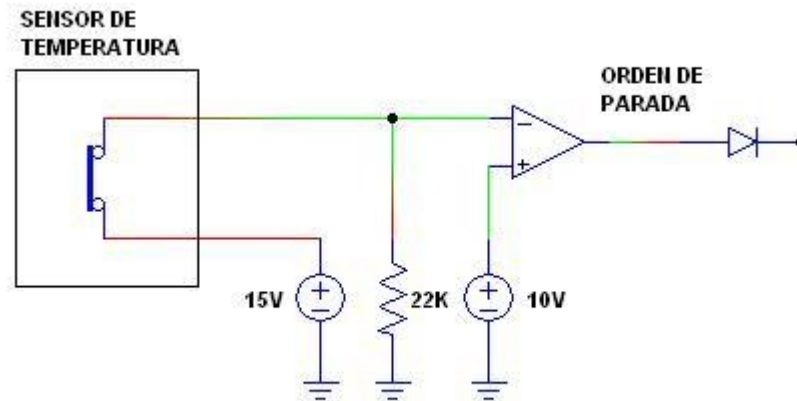
El sensor de tensión da una tensión proporcional a la tensión del Bus de continua. Cuando la tensión del bus es de 500V, el valor de la tensión del sensor es de 10,5V. La señal del sensor entra a la pata positiva del comparador, en la pata negativa entra una tensión de 10,5V. Cuando la tensión de la pata positiva es mayor que la de la pata negativa, es decir, cuando el valor de la velocidad supera las 300rpm, el comparador da 15V a la salida, que es la orden de parada que pasa por el diodo al comparador que une todas las señales de parada y se para el aerogenerador. Cuando la velocidad es menor de 300rpm, el valor del sensor de tensión es inferior de 10.5V, por lo que el comparador da una tensión de 0V, lo que es una orden de funcionamiento, si en ese momento todas las señales son de funcionamiento, el aerogenerador estará en marcha.

### 4.6.3 – Protección de temperatura

La protección de temperatura actúa sobre los semiconductores y la inductancia. Un sobrecalentamiento de alguno de estos componentes reduce su vida útil y si se calientan demasiado se pueden llegar a romper, haciendo que por efecto rebote se estropee algún componente más e incluso se puede llegar a crear un incendio.

#### 4.6.3.1 – Inductancia

La inductancia tiene incorporado un contacto normalmente cerrado, cuando aumenta mucho la temperatura, el contacto se abre. La ventaja que tiene este termostato frente a uno de contacto normalmente abierto es que si se desconecta el sensor, el circuito da una orden de parada porque el circuito se queda abierto. En la siguiente imagen se puede observar el circuito de protección.



*Orden de parada por sobrecalentamiento de la inductancia*

El sensor está conectado a 15V y a la pata negativa del comparador, la pata positiva del comparador está conectada a 10V. Cuando la temperatura es adecuada, el sensor mantiene el circuito cerrado, como la tensión del negativo es superior al del positivo, la orden del comparador es de funcionamiento, es decir, 0V. Cuando se calienta la inductancia el sensor abre el circuito, en este momento pasa a haber 0V en la pata negativa del comparador. Como la tensión del positivo es mayor que la del negativo el comparador da 15V en la salida, parando el aerogenerador.

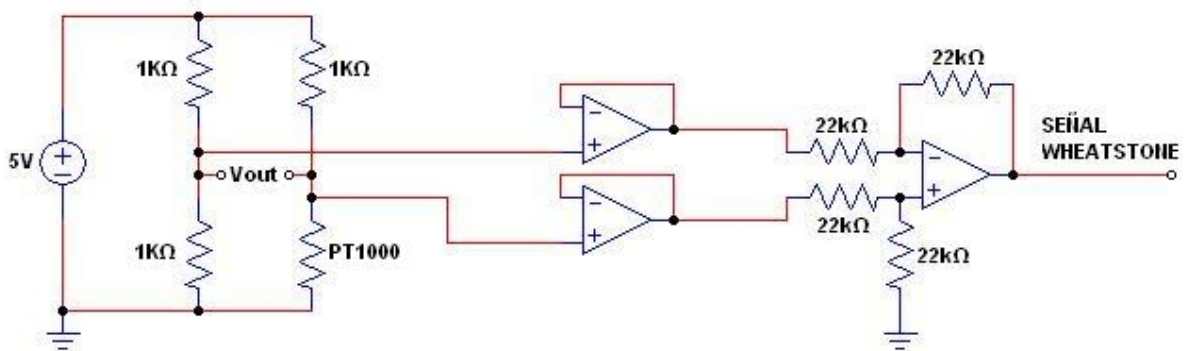
La resistencia de 22K $\Omega$  sirve para que cuando se abra el circuito, la pata negativa esté unida al negativo, si no se pone esta resistencia la pista que va a la pata negativa se queda en el aire y debido a las capacidades parásitas de la placa, adquiere una tensión que hace que la protección no funcione bien, dando una señal que enciende y apaga la protección de forma descontrolada.

#### 4.6.3.2 – Semiconductores

Para proteger los semiconductores de sobrecalentamientos, se ha colocado un sensor de temperatura en el radiador, entre el puente de diodos y el módulo de conmutación. El sensor de temperatura es una termorresistencia pt1000. Este sensor es un sensor resistivo, cuya resistencia vale 1000 $\Omega$  cuando la temperatura es de 0°C y aumenta linealmente según aumenta la temperatura, a 100°C el valor de la resistencia es de 1385 $\Omega$ . Como la variación de resistencia es muy pequeña, se ha utilizado un puente wheatstone, con esto se consigue una mayor precisión y en vez de medir temperatura se mide tensión.

Este circuito de protección está dividido en tres subcircuitos. El primero es el que mide la variación de temperatura, el segundo es el que se encarga de encender y apagar los ventiladores y el tercero es el que da la orden de parada al molino cuando la temperatura es muy alta. En los siguiente apartados se explican de manera más detallada los tres subcircuitos:

- Circuito de medida: El sensor esta montado en un puente Wheatstone, Este puente sirve para medir con más precisión la variación de resistencia, la variación de resistencia hace que en los terminales del puente haya una variación de tensión. En la siguiente imagen se puede ver el circuito de medida:



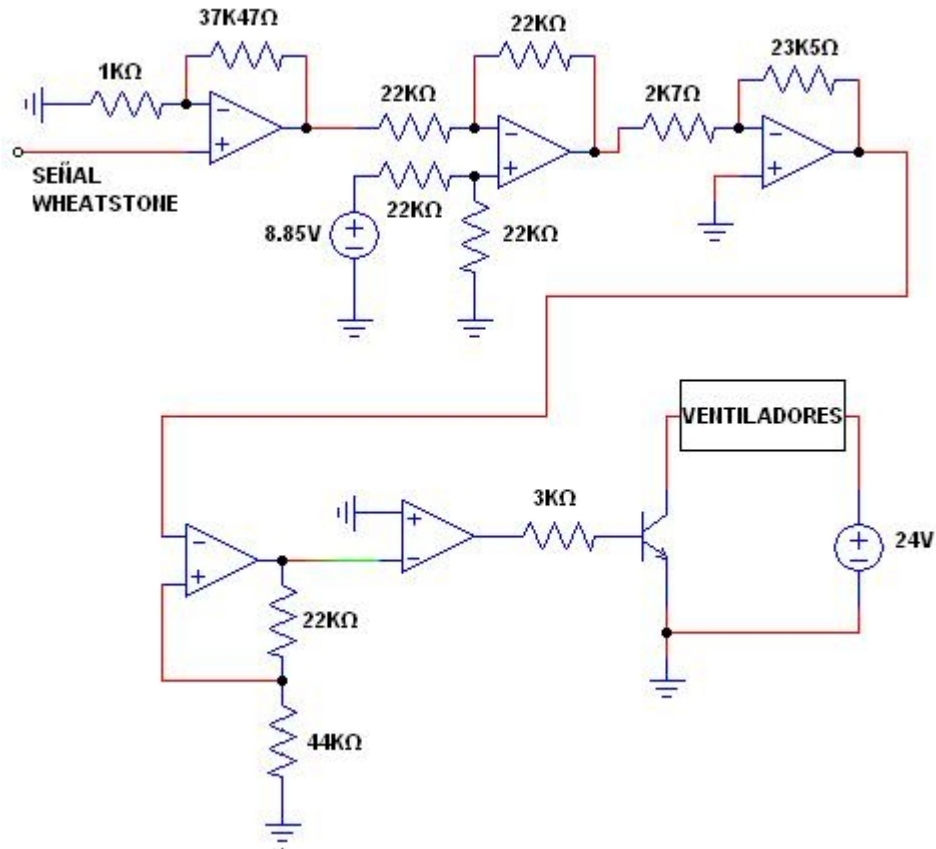
#### Medida de la temperatura en el radiador

En la imagen superior se puede ver el circuito de medida, en la parte izquierda está el puente wheatstone, con tres resistencias de  $1000\Omega$  y el sensor PT1000. El valor de  $V_{out}$  varía según lo hace la temperatura. Se colocan dos seguidores, uno en cada conexión al puente, estos dan a la salida la misma tensión que tienen a la entrada, pero no absorben corriente del puente. Después de los seguidores se hace una resta, para así obtener la tensión entre los dos puntos del puente. Esta es la señal del puente wheatstone. A continuación se muestran los valores de la tensión de salida para distintas temperaturas:

T (°C)	Vout (V)
0	0
45	0,2
60	0,26
90	0,37

- Circuito de ventilación: Este circuito tiene la función de encender unos ventiladores cuando los semiconductores empiezan a calentarse. Para evitar que los ventiladores hagan muchos encendidos y apagados seguidos se ha implementado un sistema de histéresis, los ventiladores se encienden cuando los semiconductores alcanzan una temperatura de

60°C y se apagan cuando esta baja a 45°C. En la siguiente imagen se puede ver el circuito de ventilación:



*Circuito de control de los ventiladores*

El primer amplificador operacional del circuito coge la señal del puente wheatstone y le aplica una ganancia, la señal de entrada es de 0,26V para 60°C y 0,2V para 45°C, a la salida del amplificador el valor de estas señales es de 10V y 7,7V respectivamente. En el segundo amplificador se restan 8,85V con el fin de obtener una tensión negativa a 45°C y una positiva, del mismo valor, cuando la temperatura es de 60°C, así se obtiene una tensión de +/-1,15V. A esta tensión se le aplica una ganancia en el tercer amplificador, obteniendo una tensión de 10V cuando los semiconductores están a 60°C y -10V cuando están a 45°C. El cuarto comparador es el que genera la histéresis. Cuando la señal de entrada es de 10V o mayor, la salida da una señal de -15V, y cuando esta pasa a ser menor que -10V, la señal de salida es de 15V. El comparador final invierte el valor de la señal y enciende un MOSFET, que a su vez enciende los ventiladores

- Circuito de parada por sobrecalentamiento: Este circuito tiene la función de dar la orden de parada del aerogenerador cuando la temperatura de los semiconductores es muy alta.

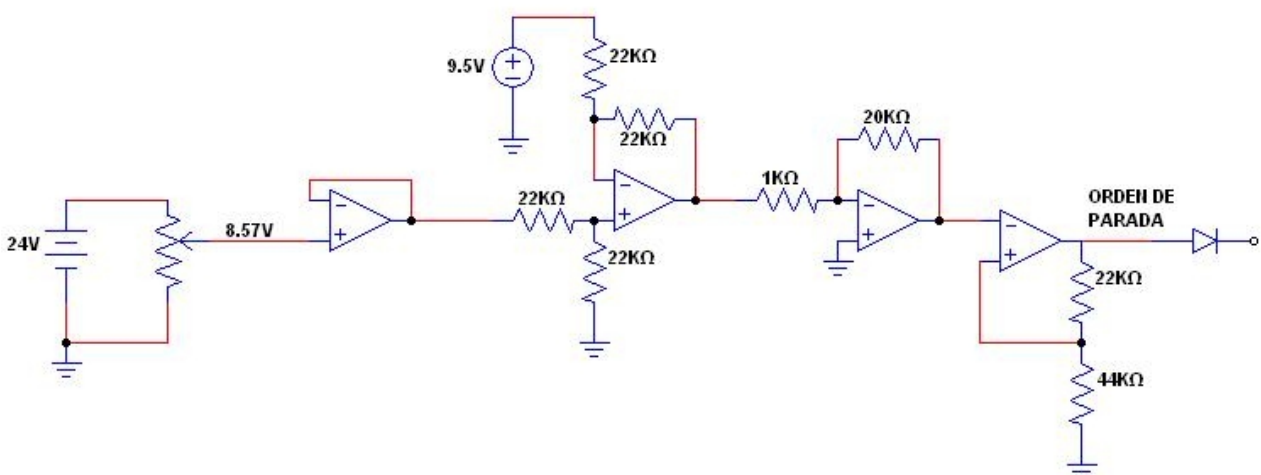
#### 4.6.4 – Protección contra sobrecarga de las baterías

La sobrecarga de las baterías es un fenómeno con el que hay que tener mucha precaución. Si las baterías se sobrecargan, su vida útil disminuye y lo que es mas peligroso, es la gasificación. Este fenómeno ocurre cuando las baterías están totalmente cargadas y se les sigue inyectando corriente, la batería suelta hidrógeno, que es un gas altamente explosivo e inoloro, por lo que no se puede detectar a menos que no se utilice un sensor especial.

Para evitar este fenómeno, hay que parar la carga de las baterías cuando estas ya están cargadas. Para ello se ha implementado un circuito electrónico que mide la tensión en las baterías y cuando estas están totalmente cargadas, es decir, cuando la tensión en bornes de las baterías llega a 56V, da una orden de parada y el circuito de parada detiene el molino, dejando de producir energía e interrumpiendo la carga.

Las baterías tienen una resistencia interna en serie con la fuente de tensión, cuando circula una corriente hay una caída de tensión en la resistencia, esto significa que la medida que se hace, en realidad no mide la tensión exacta de las baterías, sino el valor de estas más el valor de la caída de tensión en la resistencia interna. Cuando se para la carga, no circula corriente por las baterías y la corriente que se mide es exactamente la de las baterías, cuyo valor es inferior a la lectura anterior. Esto puede hacer que el circuito de control de carga interprete que las baterías ya se han descargado en parte, dando una orden de encendido al molino. Esto puede hacer que el molino arranque y pare muchas veces cuando las baterías están cargadas.

Para evitar este problema se ha implementado un ciclo de histéresis, por el cual la carga se detiene cuando las baterías están a 56V y no se vuelve a arrancar el molino hasta que la tensión en bornes de las baterías no baja de 50V. Este sistema evita los continuos arranques y paradas del aerogenerador. En la siguiente imagen se puede ver el circuito electrónico que regula la carga.



*Orden de parada por sobrecarga de las baterías*

Para la medida de tensión de las baterías se mide la tensión entre dos de ellas, que será la mitad de la tensión de las baterías. Esto se hace así porque las placas electrónicas se alimentan a 24V desde las baterías y se aprovecha el mismo cable que alimenta la electrónica para tomar la medida de la tensión. Se utiliza un potenciómetro como divisor de tensión. Cuando las baterías están totalmente cargadas, es decir, cuando la medida de tensión es de 28V, la tensión a la salida del potenciómetro es de 10V, y cuando están a 25V, que es cuando se vuelve a encender el aerogenerador, la señal es de 9V. Se hace un resta de 9,5V, consiguiendo un tensión de 0,5V cuando las baterías están totalmente cargadas y -0,5V cuando hay que volver a poner en marcha el aerogenerador. El tercer amplificador aplica una ganancia de 20, por lo que la tensión de las ordenes pasa a ser de +/-10V. El último amplificador operacional genera una histéresis, haciendo que salga una orden de parada cuando las baterías están a 56V y manteniendo esta orden hasta que las baterías bajan de los 50V.

#### **4.6.5 – Protección contra cortocircuito**

Para proteger el convertidor ante un cortocircuito hay dos protecciones distintas. La primera está en el driver del IGBT, cuando el driver detecta un cortocircuito en el IGBT lo apaga, evitando la destrucción de este.

Este sistema no protege del todo el convertidor, ya que si se produce un cortocircuito en el diodo, las baterías quedarían cortocircuitadas. Este cortocircuito estropearía las baterías y la sobrecorriente que se generaría podría provocar un incendio. Para evitar que pase esto, se ha colocado un fusible de 120A a la salida del convertidor, si la corriente excede en un 50% la del convertidor el fusible actúa desconectando el convertidor de las baterías.

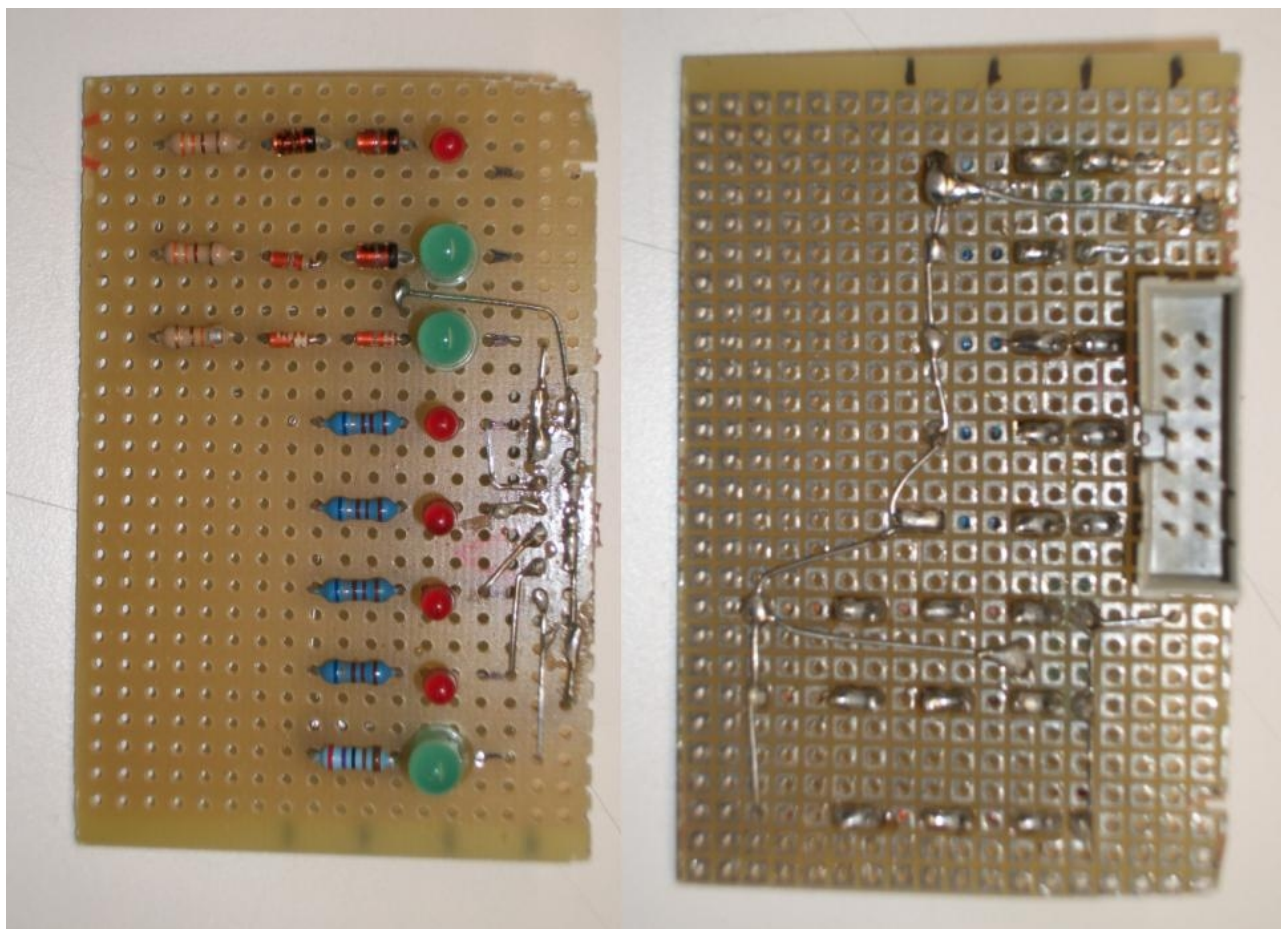
No se ha puesto un fusible más pequeño ya que pueden producirse picos de corriente que no afectan al funcionamiento del convertidor, ya que los semiconductores aguantan corrientes superiores a los 120A, y la inductancia puede soportarlos, aunque no de manera continua, si se producen muchas sobrecorrientes inferiores a 120A, aunque el fusible no los detecte, si alguno de los componentes se calienta más de lo debido, las protecciones contra sobrecalentamiento actúan refrigerando el convertidor y si hiciese falta parándolo.

Aguas arriba del convertidor no hay ningún sistema de protección, solo el sistema de parada del aerogenerador. No se pueden colocar fusibles aguas arriba del convertidor, ya que en caso de sobrecorriente o cortocircuito estos se fundirían, por lo que el molino se embalaría y el mecanismo de parada no podría actuar debido a que estaría desconectado del aerogenerador.

#### **4.6.6 – Panel indicador de estado**

En el armario donde se aloja la electrónica se ha colocado un pequeño circuito para indicar el estado del convertidor. Este circuito está compuesto por una serie de diodos led, que indican las distintas ordenes de parada, el estado de los ventiladores y el nivel de carga de las baterías. En la siguiente imagen se puede ver la placa electrónica donde se aloja el circuito.





*Panel indicador de estado*

En la imagen superior se puede ver la placa donde se aloja el circuito indicador de estado. El circuito está montado sobre una placa para prototipos. En la parte derecha de la imagen se puede apreciar la parte inferior de la placa, donde hay un conector, de donde sale un cable hacia la placa de control, este cable es el que transmite las señales de una placa a otra. Todos los leds llevan una resistencia en serie, que sirve para regular la corriente que pasa por ellos, para que no se quemen. A continuación se enumera la función de cada led:

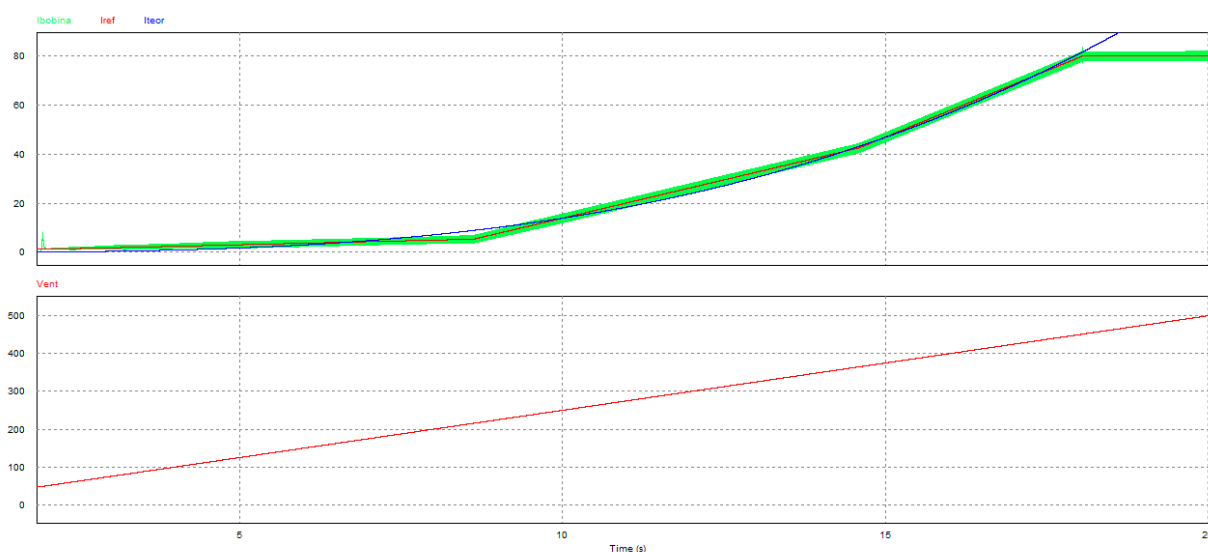
- Leds 1, 2 y 3: Los tres primeros leds sirven para mostrar el estado de la carga. Cada uno de ellos lleva dos diodos zener y una resistencia en serie. Los diodos zener son de distinto valor para cada led, sirven para que el diodo led se encienda solo por encima de un valor de tensión, cada led se enciende por encima de un nivel de tensión. El primero se enciende a partir de 44V, el segundo lo hace a los 48V y el tercero a partir de 54V. Si solo se enciende el primer led, el rojo, significa que el nivel de carga de las baterías es bajo, en torno a un 20%, si se encienden dos leds significa que las baterías están aproximadamente a un 60% de su capacidad de carga y si se encienden los tres leds, significa que la batería está totalmente cargada.
- Led 4: Cuando se enciende este led, de color rojo, significa que se ha activado la señal de parada del aerogenerador por protección contra embalamiento.
- Led 5: Cuando se enciende este led, de color rojo, significa que se ha activado la señal de

parada del aerogenerador por protección contra sobrecalentamiento de la inductancia.

- Led 6: Cuando se enciende este led, de color rojo, significa que se ha activado la señal de parada del aerogenerador por protección contra sobrecalentamiento de los semiconductores.
- Led 7: Cuando se enciende este led, de color rojo, significa que se ha activado la señal de parada del aerogenerador por protección de sobrecarga de baterías, es decir, que las baterías están totalmente cargadas..
- Led 8: Cuando se enciende este led, de color verde, significa que se ha activado la protección contra sobrecalentamiento de los semiconductores y los ventiladores de refrigeración están en funcionamiento.

## 4.7 – Simulación del sistema

Antes de construir el circuito electrónico de control, se ha simulado con el programa PSIM. El valor de la simulación no es exactamente igual al de la realidad, pero es una buena aproximación. En la siguiente imagen se muestra por un lado la tensión de entrada en el bus de continua, por el otro lado se muestra la corriente en la salida, la corriente de referencia y la corriente teórica.



*Valores de corrientes y tensión del convertidor*

## 4.8 – Implementación de los circuitos electrónicos

Una vez diseñados todos los circuitos electrónicos estos se han implementado en placas PCB. A continuación se describen los componentes más utilizados:

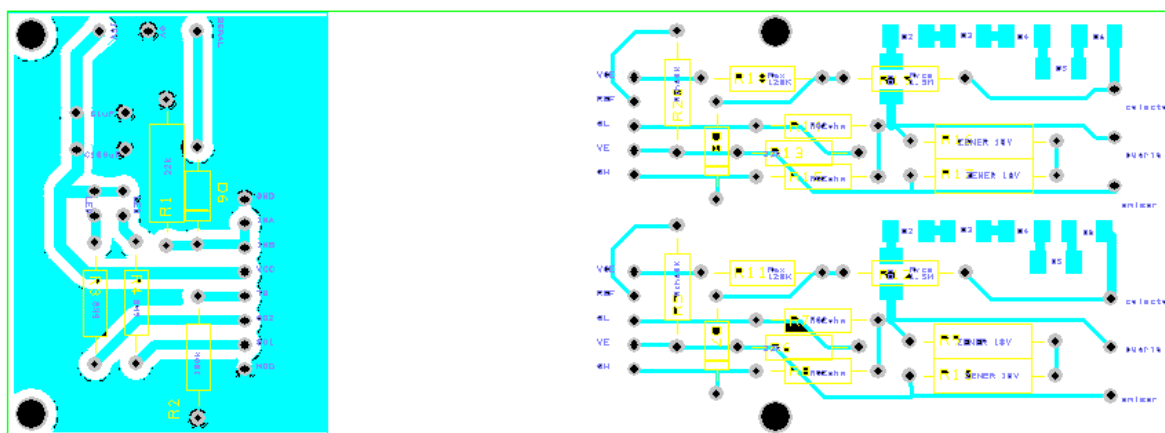
- Resistencias: Se han utilizado resistencias de precisión, cuya variación de resistencia debido a la temperatura es del 1%.

- Amplificadores operacionales: Se ha utilizado el circuito integrado LM358N, que contiene dos amplificadores operacionales cada uno.
- Comparador: Se ha utilizado el comparador LM311N, que contiene un solo comparador
- Condensadores de alimentación: A la alimentación de todos los circuitos integrados se le ha unido un condensador rápido de 100nF con el fin de estabilizar la tensión de alimentación frente a transitorios. En la alimentación de las placas y en las salidas de las fuentes de alimentación, además de los condensadores rápidos de 100nF, se han colocado condensadores electrolíticos de 100μF.
- Zócalos: En vez de soldar los circuitos integrados directamente en las placas, se han soldado unos zócalos sobre los que se conectan los CI. Esto permite cambiarlos fácilmente si alguno de ellos se estropea.

Las placas electrónicas se han diseñado con el programa design spark. Como todos los circuitos requieren una placa muy grande, la electrónica se ha dividido en tres placas, una de control, otra de protecciones y otra para el driver. Las dos primeras se han hecho a dos caras, es decir, que hay pistas tanto por la parte superior como la inferior de la placa, la placa del driver se ha hecho a una sola cara porque es más fácil de diseñar.

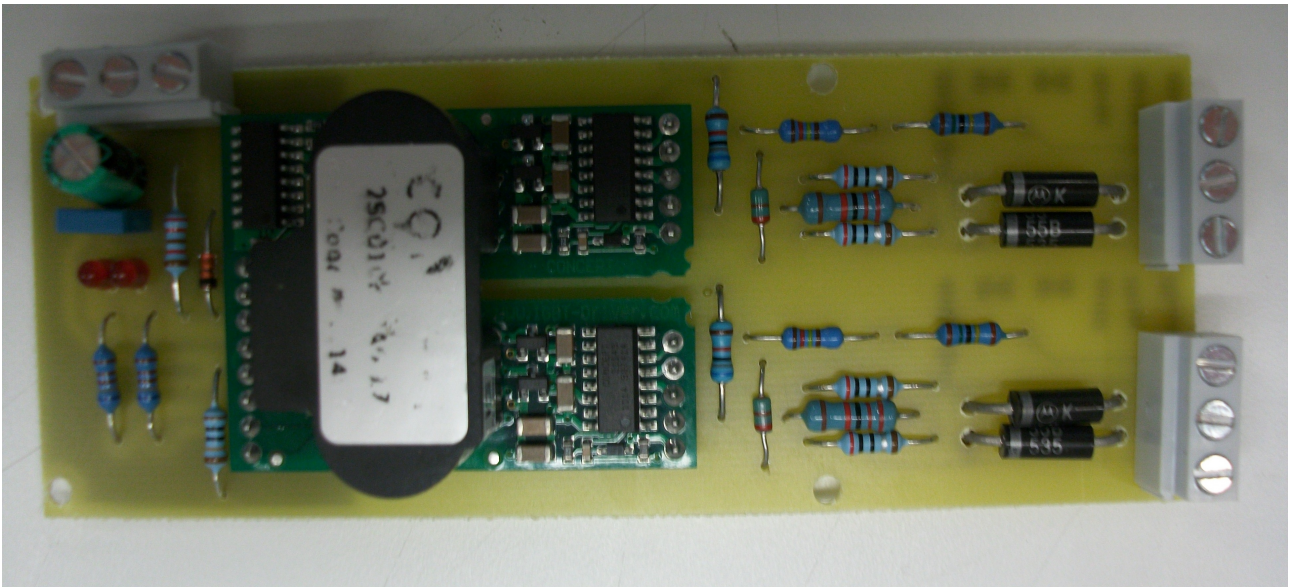
En estas placas se ha dibujado el circuito electrónico con las medidas de cada componente y se han hecho con una máquina de control numérico. Las señales se envían mediante pistas por toda la placa, todo el espacio sobrante de la placa por donde no hay pistas se ha dejado con una capa de cobre conectada al neutro del sistema, esto sirve para que los ruidos que se cuelan en el circuito sean menores y agiliza el trabajo de la máquina que hace las placas, ya que la superficie de cobre que tiene que comer es considerablemente menor.

Una vez hechas las placas se han soldado todos los componentes, se ha comprobado que todas las conexiones estaban bien hechas, se han cableado y se han puesto en marcha. En las siguientes imágenes se pueden ver el diseño de la placa del driver en design spark y las placas ya construidas. Se ha omitido la imagen del diseño de las otras dos placas porque al ser tan grandes no se podían distinguir bien los componentes.

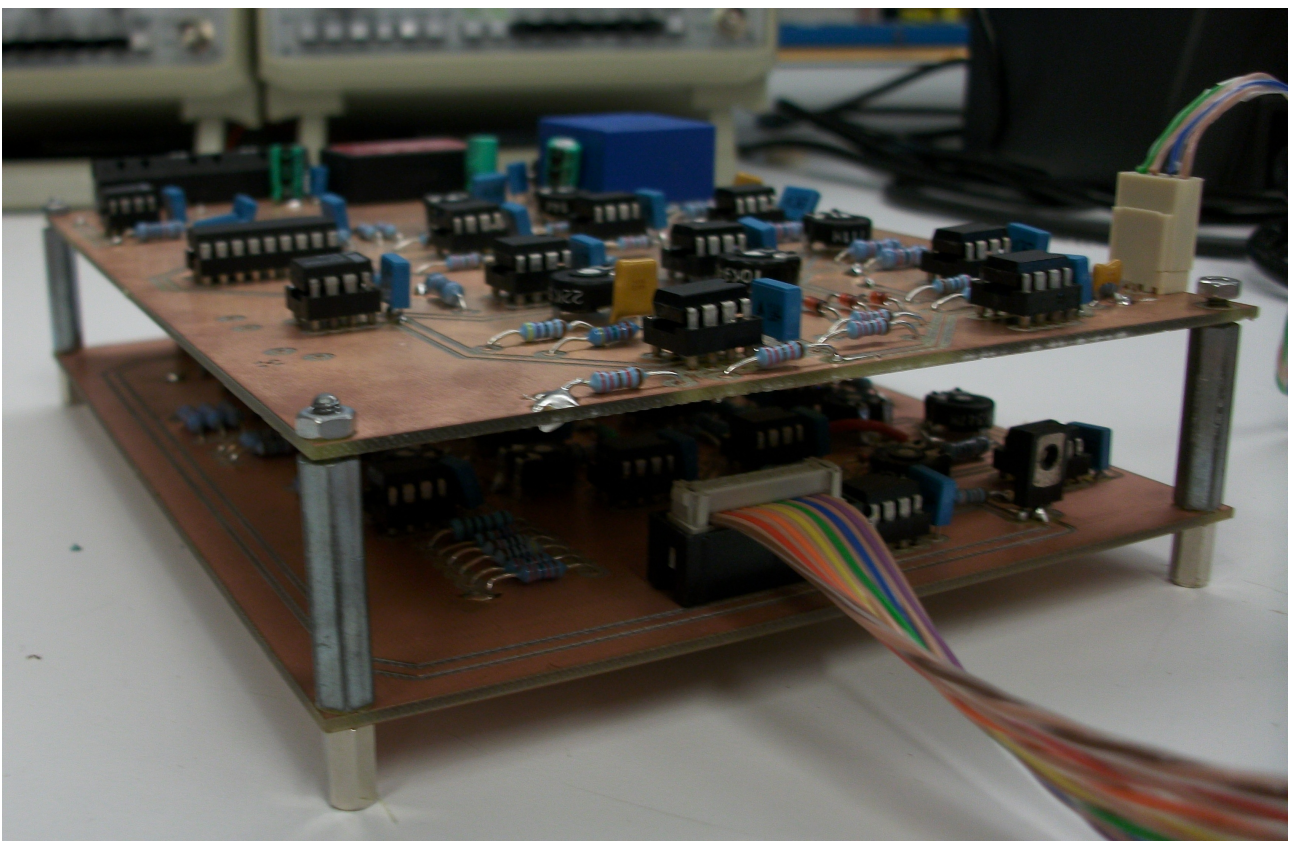


Plano de la placa PCB para el driver





*Driver*



*Placa de control (Encima) y placa de protecciones (Debajo)*

## **5º CAPÍTULO - BATERÍAS**

## 5.1 Introducción:

La energía creada por el aerogenerador, puede consumirse directamente por una carga o sino debe acumularse en baterías. En el caso de este aerogenerador, toda la energía generada pasa a 48V a las baterías, y después se conecta a un inversor, de manera que la energía que no consume el inversor se acumula en las baterías. En los momentos en los que el aerogenerador genera menos energía que la que demanda la carga, el inversor obtiene la energía necesaria de las baterías.

La capacidad de almacenamiento de energía varía según cada tipo de instalación. En una instalación aislada de la red eléctrica, hay que tener en cuenta que puede haber varios días en los que la energía generada no sea suficiente, por lo que las baterías deben de tener una autonomía de varios días, si la instalación esta conectada a la red, no es necesario tener una gran autonomía, ya que en el momento en el que las baterías estén descargadas, se puede consumir energía de la red, con esto se consigue reducir el coste de la instalación, ya que las baterías no son nada baratas. En el caso de combinar varias fuentes de generación, como pueden ser los paneles fotovoltaicos o la micro-hidráulica, la capacidad de almacenamiento es menor, ya que cuando no hay viento, es posible que se este generando electricidad mediante otra fuente distinta.

Se le denomina batería al dispositivo que almacena energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad. Se trata de un generador eléctrico secundario, es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga.

## 5.2 Tipos de baterías:

En el mercado existen distintos tipos de baterías, cada tipo es mas o menos adecuado para cada aplicación. A continuación se muestran los tipos de baterías más comunes.

### 5.2.1 – Baterías de plomo-ácido

Este tipo de baterías están formadas por dos electrodos de plomo, y suele utilizarse en los automóviles.

Con respecto a su funcionamiento, en el proceso de carga, el sulfato de plomo se convierte en plomo metal en el cátodo o polo negativo. Por otra parte, en el polo positivo o ánodo se produce la formación de óxido de plomo.

En el proceso de descarga, los procesos mencionados anteriormente se llevan a cabo de forma invertida. De esta manera el óxido de plomo se reduce a sulfato de plomo, y en el ánodo el plomo comienza a oxidarse, convirtiéndose en sulfato de plomo.

Sin embargo este tipo de transformación no puede ser repetido de manera indefinida. Luego de un tiempo, el sulfato de plomo forma cristales, y no es posible realizar el proceso de



manera reversible. Es en ese momento cuando la batería se ha sulfatado y ya no es posible volver a emplearla.

### **5.2.2 – Pila alcalina**

Esta clase de pilas están formadas por cloruro de sodio o de potasio. Cuentan con potencia y corriente de gran estabilidad debido a la amplia movilidad de los iones a través del electrolito.

Las pilas alcalinas están blindadas con el propósito de que no se viertan los componentes de la misma.

### **5.2.3 – Baterías de níquel-hierro(NI-FE)**

Esta clase de baterías fue desarrollada por Edison a principios del siglo XX. Se conformaba por filas de tubos compuestos por acero niquelado, los cuales contenían hidróxido de níquel. El polo positivo contenía acero niquelado con polvo de óxido ferroso.

Las baterías de níquel son de fabricación simple, bajo costo y pueden sobrecargarse o descargarse reiteradas veces sin por ello perder su capacidad.

### **5.2.4 – Baterías alcalinas de manganeso**

Son similares a las pilas alcalinas, con la excepción de que están conformadas por hidróxido de potasio. Su envoltura es de acero y el zinc está en polvo, ubicado en el centro.

Las baterías alcalinas de manganeso tienen un valor elevado y se emplean en máquinas de mayor consumo de energía como juguetes con motor.

### **5.2.5 – Baterías de níquel-cadmio(NI-CD)**

Este tipo de batería funciona a partir de un ánodo de cadmio y un cátodo compuesto por hidróxido de níquel. Por su parte, el electrolito es de hidróxido de potasio. Pueden ser recargadas una vez gastadas, aunque disponen de poca capacidad.

### **5.2.6 - Baterías de níquel-hidruro metálico (NI-MH)**

Emplean un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo compuesto por una aleación de hidruro metálico. Son reacias al contacto con las bajas temperaturas, disminuyendo en gran parte su eficacia.

### **5.2.7 - Baterías de iones de litio (LI-ION)**

Este tipo de batería dispone de un ánodo de grafito, mientras que el cátodo funciona a partir de óxido de cobalto, óxido de manganeso o trifilina. No permiten la descarga y son capaces de alcanzar potencias elevadas. Sin embargo se ven afectadas por los cambios de temperatura.

### **5.2.8 - Baterías de polímero de litio (LIPO)**

Cuentan con características análogas a las baterías de iones de litio, aunque su densidad es mayor. Son de tamaño reducido por lo que suelen utilizarse en pequeños equipos.

## **5.3 - Características de la batería de Plomo-Ácido:**

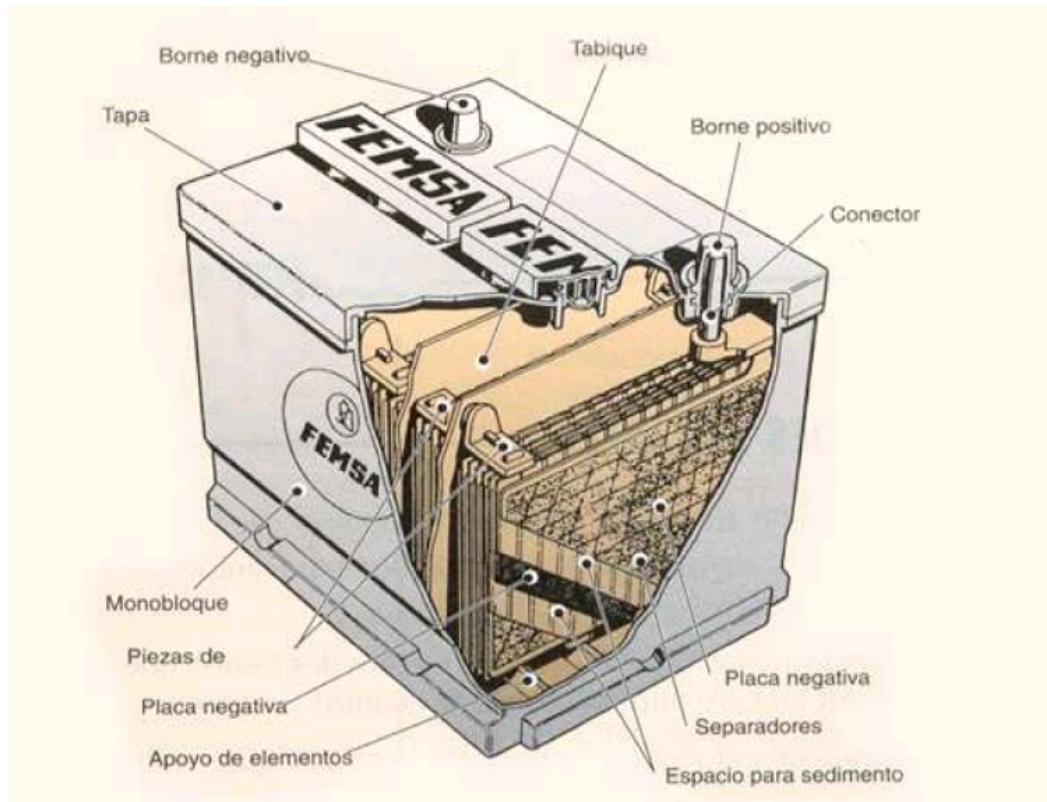
A continuación se describe más a fondo las baterías de plomo-ácido ya que para acumular la energía sobrante del aerogenerador se utilizarán este tipo de baterías.

Las baterías de plomo ácido se crean en pilas de 2V, en el caso de la batería comercial, para poder ofrecer un voltaje de salida práctico, posee varias celdas de 2V conectadas en serie. En la Figura siguiente se muestra la estructura interna y externa de una batería de Pb-ácido para automóvil, donde se observa la conexión en serie de las celdas, las que están físicamente separadas por particiones dentro de la caja que las contiene. Cada celda está compuesta de varias placas positivas y negativas, las que tienen separadores intermedios. Todas las placas de igual polaridad, dentro de una celda, están conectadas en paralelo. El uso de varias placas de igual polaridad permite aumentar la superficie activa de una celda, aumentando su capacidad.

El voltaje proporcionado por una batería es de corriente continua. Para cargarla se necesita un generador de corriente continua, el que deberá ser conectado con la polaridad correcta, el positivo del generador al positivo de la batería y el negativo del generador al negativo de la batería. Para poder forzar una corriente de carga, el voltaje del generador deberá ser superior al de la batería.

La energía suministrada por el aerogenerador es de corriente alterna, por lo que primero se rectificará y después se transformará en un convertidor dc/dc que controlará la carga de las baterías.

En la siguiente imagen se puede apreciar una batería de plomo ácido de coche con sus distintos componentes.



Esquema de la batería de plomo-ácido

### 5.3.1 - Ciclo de carga

Para la carga, se observa que el voltaje correspondiente a un estado de carga y corriente de carga, es siempre menor cuando la temperatura disminuye. Es conveniente cargar una batería con un nivel de corriente menor o igual al 10% de su capacidad. Si el valor de la corriente es mayor, la batería se sobrecalentará durante la carga, las pérdidas serán mayores y disminuirá la vida útil de la batería.

El proceso de la batería es reversible. Si desconectamos el generador y conectamos una carga eléctrica a la batería, circulará una corriente a través de ésta, en dirección opuesta a la de carga, provocando reacciones químicas en los electrodos que vuelven el sistema a su condición inicial. En principio, el ciclo de carga-descarga puede ser repetido indefinidamente. En la práctica existen limitaciones para el máximo número de ellos, ya que los electrodos pierden parte del material con cada descarga.

### 5.3.2 - Ciclo de descarga

Para la descarga de una batería, la corriente de salida puede ser mucho mayor que la de carga. De hecho, muchas de estas baterías están diseñadas para descargas muy rápidas y profundas, pero lo que no es bueno es que se queden descargadas durante mucho tiempo.

### *Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga*

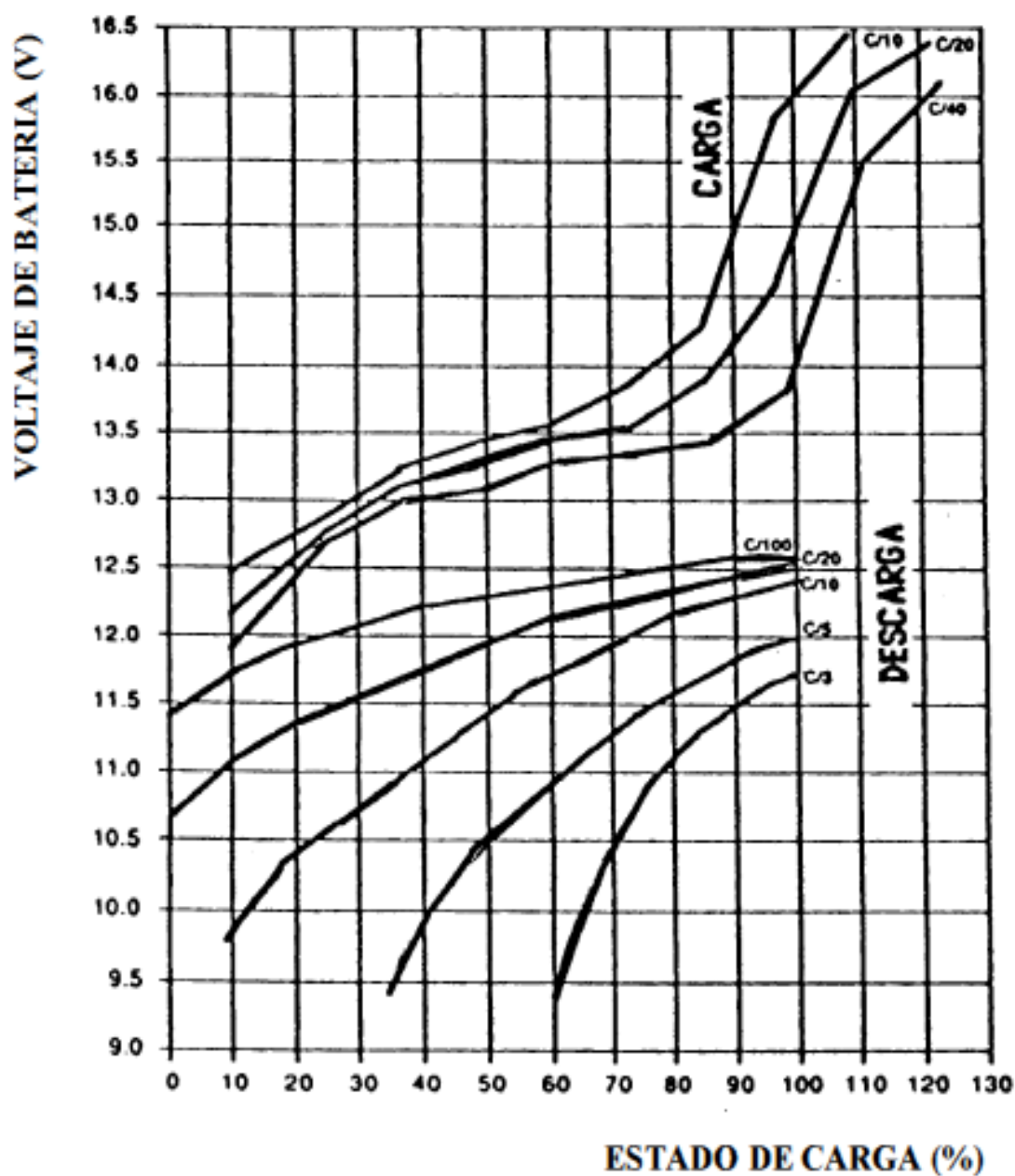
Cuanto mayor sea la corriente de descarga, el valor de la resistencia interna se hace mayor, empeorando el rendimiento y calentándose la batería.

Las curvas de descarga muestran que a baja temperatura la caída de voltaje es mucho más severa que la que se observa, para la misma corriente, a 25°C. La baja temperatura retarda la reacción química, lo que se traduce en un brusco aumento de la resistencia interna de la batería, lo que provoca una mayor caída del voltaje. Se observa, asimismo, que si se mantiene constante la temperatura del electrolito, la caída de voltaje es siempre mayor (aumento de la resistencia interna) cuando la corriente de descarga aumenta.

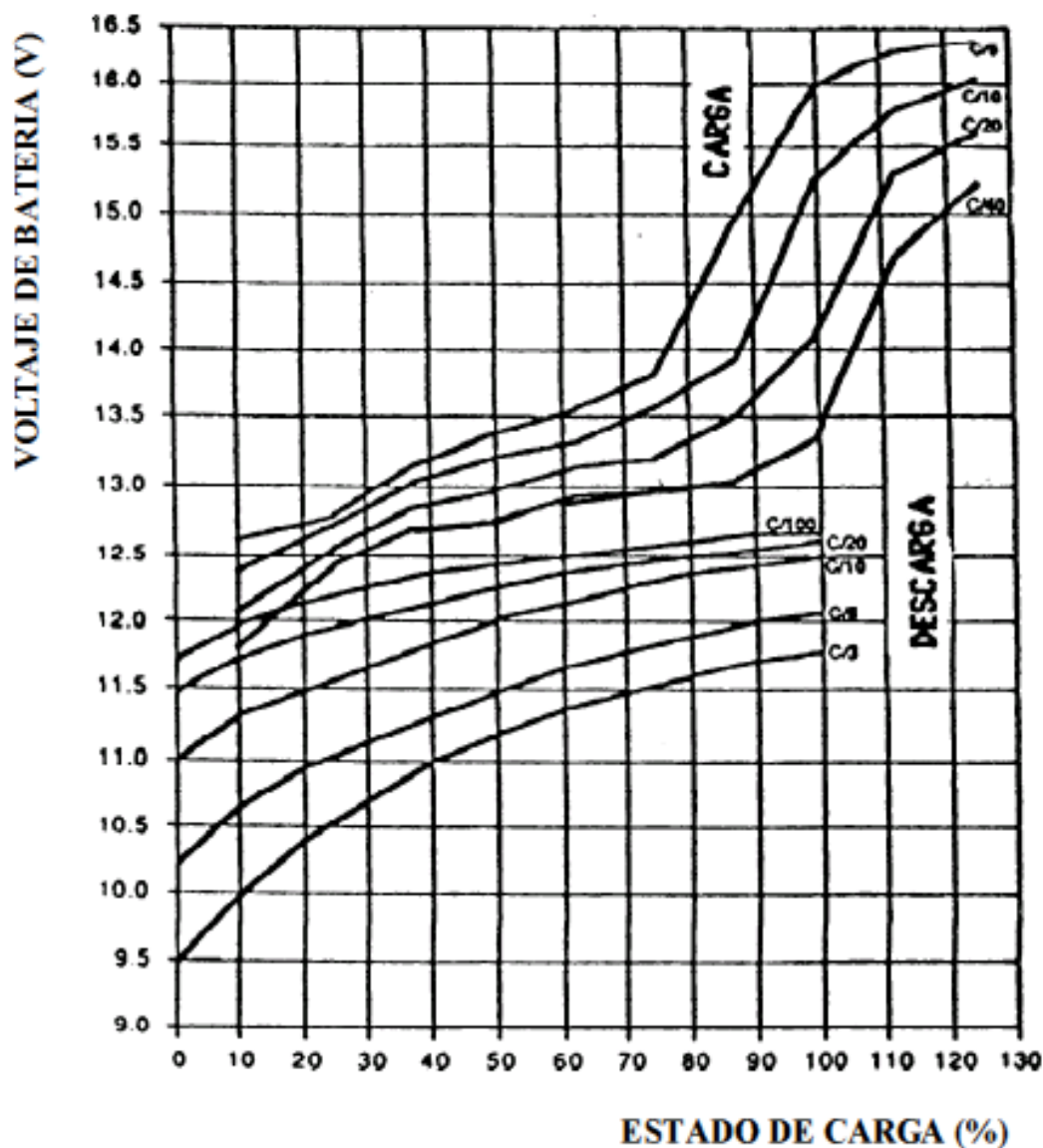
En las siguientes gráficas se muestra la variación de tensión respecto al estado de carga para ciclos de carga y descarga, para temperaturas comprendidas entre 1°C y 25°C.

## VARIACION EN EL VOLTAJE DE UNA BATERIA DE Pb-ACIDO DE 12V

Temperatura del Electrolito: 1°C

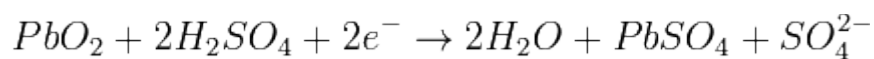


**VARIACION EN EL VOLTAJE  
DE UNA BATERIA DE Pb-ACIDO DE 12V**  
Temperatura del Electrolito: 25°C

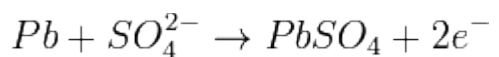


### 5.3.3 - Reacciones en el interior de la batería

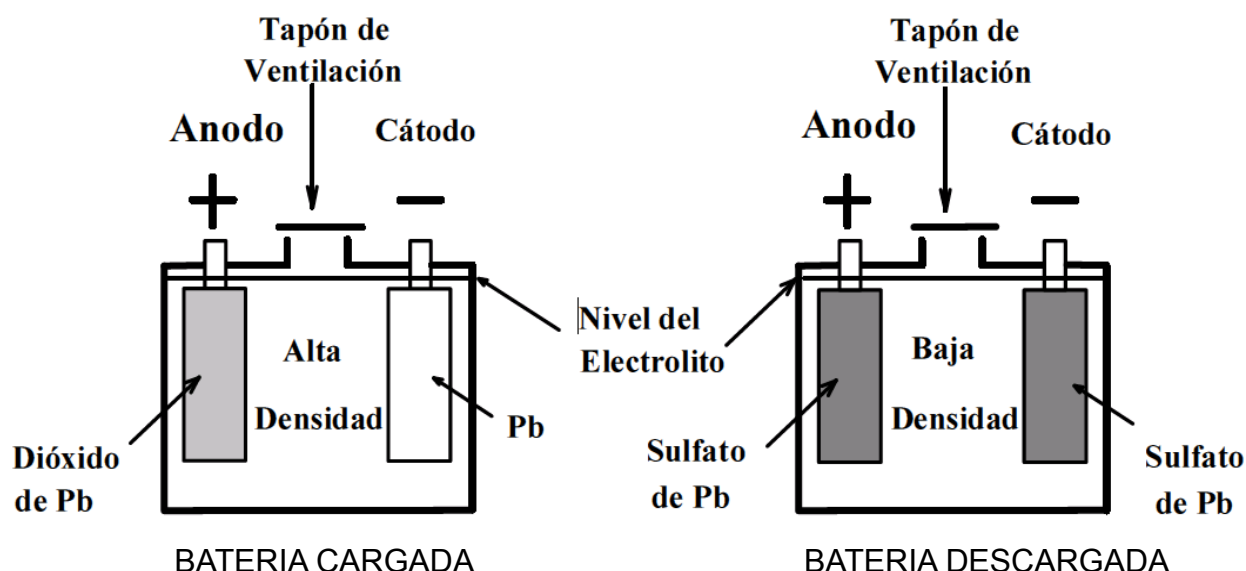
Al cargar la batería, suceden las mismas reacciones que al descargarla, pero en sentido opuesto. Las reacciones son las siguientes:







El tipo de acumulador más usado en el presente, dado su bajo costo, es la batería de plomo y ácido sulfúrico con electrolito líquido. En ella, los dos electrodos están hechos de plomo y el electrolito es una solución de agua destilada y ácido sulfúrico. Cuando la batería está cargada, el electrodo positivo tiene un depósito de dióxido de plomo y el negativo es plomo. Al descargarse, la reacción química que toma lugar hace que, tanto la placa positiva como la negativa, tengan un depósito de sulfato de plomo. En la siguientes figuras se ilustran los dos estados.



### 5.3.4 - Precauciones que se deben de tomar con las baterías

Para trabajar con las baterías de plomo-ácido hay que tomar varias precauciones tanto por seguridad como para alargar la vida útil de estas:

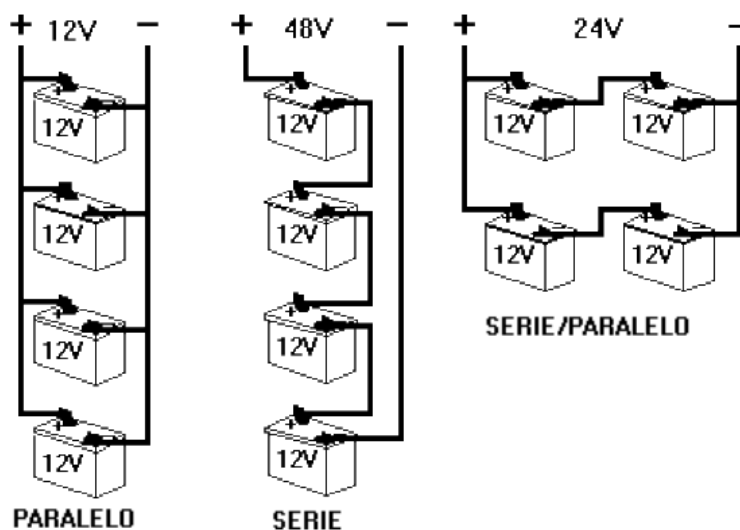
- **Transporte:** A la hora de mover las baterías de un lado a otro hay que tener mucho cuidado para que no se derrame el ácido sulfúrico que llevan dentro. Muchas baterías de plomo-ácido están selladas herméticamente, pero hay algunas que no. El ácido puede producir quemaduras en la piel, y si se derrama al suelo es muy perjudicial para el medio ambiente.
- **Gasificación:** Cuando una batería de plomo-ácido está próxima a alcanzar el 100% de su carga, la cantidad de agua en el electrolito ha sido severamente reducida. Los iones que ésta provee se hacen más escasos, disminuyendo la posibilidad para el ión de hidrógeno (electrodo negativo) y para el ion de oxígeno (electrodo positivo) de reaccionar químicamente, formando plomo y dióxido de plomo, respectivamente. Si la corriente de carga continúa al mismo nivel, el exceso de gases escapa del electrolito produciendo un intenso burbujeo, el que se conoce como "gasificación". Esta gasificación masiva muchas veces hace que se escape por el tapón de respiración y oxide los bornes de las baterías por el ácido. Esto significa que el ácido del electrolito se disminuye, y a su vez la capacidad de carga de la batería. La gasificación es peligrosa debido a que el gas que sale es hidrógeno y es muy explosivo. Para prevenir que esto pase hay que controlar muy bien el estado de carga de las baterías, para que nunca se exceda del 100%.

- Sulfatación: Hemos visto que la descarga de las baterías de plomo-ácido trae aparejado un depósito de sulfato de plomo en ambas placas. Normalmente este depósito está constituido por pequeños cristales, que se descomponen fácilmente durante el proceso de carga. Si, por el contrario, la batería ha sido descargada repetidas veces por debajo del mínimo especificado, es pobremente cargada, o permanece descargada por largo tiempo, el tamaño de los cristales crece, y sólo una parte de ellos interviene en el proceso de carga. Esto se traduce en una disminución de la superficie activa del electrodo, disminuyendo la capacidad de almacenaje. Este fenómeno se lo conoce con el nombre de sulfatación de la batería. En lugares donde los períodos nublados son de larga duración las baterías pueden permanecer en estado de baja carga, por largo tiempo, induciendo la sulfatación de las placas. Una carga a régimen de corriente elevado puede disolver esta formación cristalina (proceso de ecualización).

## 5.4 Elección de batería

A la hora de seleccionar las baterías como acumuladores de energía, elegimos las de plomo-ácido, ya que son las mas baratas que existen en el mercado y es fácil adquirirlas a bajo precio. En nuestro caso utilizaremos baterías de coche.

Las baterías se pueden conectar en serie o en paralelo según las necesidades de cada aplicación.



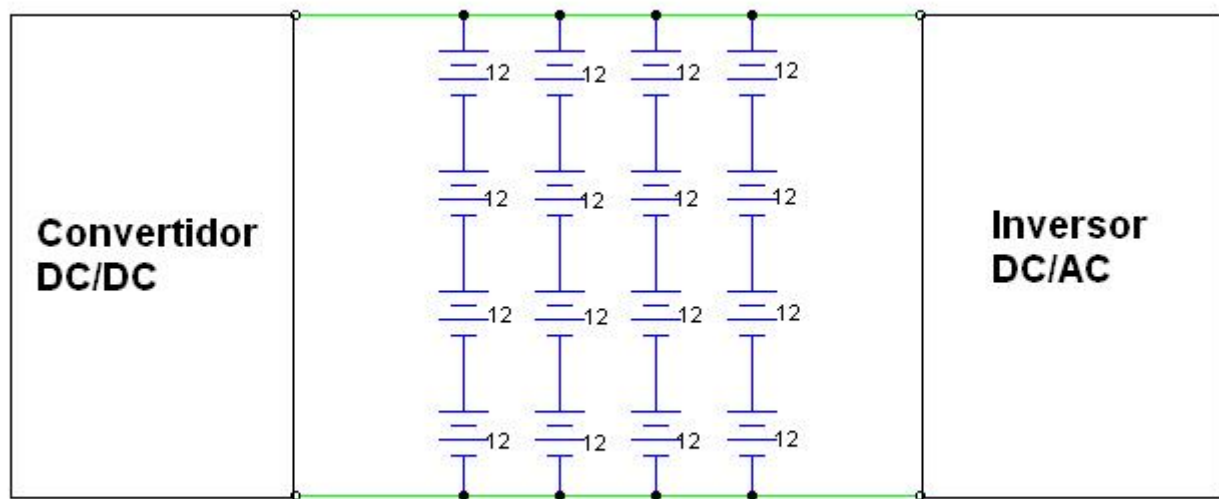
*Baterías combinadas en serie-paralelo*

Como se puede observar en la imagen anterior se puede ver las combinaciones posibles que se pueden hacer con las baterías. Cuando se combinan en paralelo, lo que se intenta es mantener la tensión y aumentar la capacidad, pudiendo dar mas corriente a la carga. A su vez, en serie lo que se hace es aumentar la tensión y mantener la corriente, otra forma de aumentar la capacidad.

La capacidad de una batería se mide en Ah, significa la cantidad de amperios que puede dar la batería en una descarga de una hora. Si una batería es de 12V y 55Ah, significa que para descargarla por completo durante una hora hay que extraerle 55A, o puede dar una corriente de 1A durante 55h. El valor de su capacidad es de 660W/h.

## 5.5 - Instalación de las baterías

La instalación de las baterías tiene una tensión de 48V, por lo que hay que poner 4 baterías de coche en serie para conseguir la tensión necesaria. La capacidad de cada batería es de 55Ah, con el objetivo de tener una mayor capacidad se ponen cuatro ramas de cuatro baterías en paralelo, con una capacidad total de 220Ah. La energía acumulada total es de 10,56kW/h, lo que según los cálculos de demanda diaria, supone una autonomía de casi dos días. En la siguiente imagen se pueden ver las conexiones de las baterías.



El convertidor DC/DC se encarga de transformar la energía generada por el aerogenerador para cargar las baterías. Este convertidor tiene varios sistemas de protección, uno de ellos se encarga de parar el aerogenerador cuando las baterías están totalmente cargadas, para evitar que se produzca el fenómeno de la gasificación.

La única carga que tienen las baterías es el inversor, que no se ha tratado en este proyecto. El inversor alimenta la vivienda con una tensión alterna de 230V. El Inversor tiene un sistema de apagado para estados de carga de batería bajos, así se consigue que las descargas no sean más profundas de lo que deben, alargando la vida útil de las baterías.

Tanto a la salida del convertidor como en la entrada del inversor se colocan dos fusibles, para proteger las baterías ante cortocircuitos.

Es posible que alguna celda de una batería se cortocircuite, al estar varias ramas en paralelo, esta batería acabaría por descargar las demás. En caso de que se note que la capacidad del conjunto de las baterías disminuye de manera importante, es muy posible que sea por este motivo. En este caso habría que soltar todas las baterías y tomar medidas de todas ellas hasta encontrar la batería averiada. Una vez detectada la batería rota, solo hay que sustituirla y volver a

disfrutar de la energía gratuita que nos brinda el aerogenerador.

## **6º CAPÍTULO – INSTALACIÓN ELÉCTRICA**

## **6.1 – Introducción**

La instalación eléctrica que se estudia en este apartado es la que une el aerogenerador con el armario que contiene la electrónica que transforma la electricidad para cargar las baterías. El aerogenerador está situado a 150 metros del caserío donde se albergan las baterías. Se diferencian tres tramos en la instalación:

- Bajada desde el aerogenerador hasta la base de la torre.
- Línea subterránea: que transcurre bajo una explotación agrícola, desde la base de la torre, hasta el caserío.
- Línea interior de la vivienda: transcurre desde la entrada de los cables al caserío hasta el armario que contiene la electrónica.

La instalación está diseñada según el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, utilizando las diferentes ITCs para cada tramo.

## **6.2 – Bajada de la torre**

La torre tiene una altura total de 10 metros, el cable está anclado en la parte superior, y baja dentro de un tubo, para estar mejor protegido contra los fenómenos atmosféricos.

El RBT indica que el cable puede ir directamente grapado o sino dentro de un tubo, su aislamiento asignado debe ser 0,6/1kV y el tubo debe tener una tapa superior para que no entre agua por este.

## **6.3 – Línea subterránea**

El tramo de línea subterránea es de 150m y cruza una explotación agrícola. Este tramo cumple las normas de la Instrucción técnica complementaria 07 (ITC-BT-07), que regula las redes subterráneas para distribución en baja tensión.

El cable discurre por un tubo enterrado de 60mm de diámetro, el reglamento indica que la relación entre el diámetro del tubo y el diámetro aparente de los cables debe ser mínimo 2, en este caso se cumple con holgura.

La profundidad del tubo es de 1,2 metros, en muchos casos es suficiente con menos



profundidad, pero como los aperos que se usan en la explotación pueden llegar a una profundidad de 0,8m y a veces incluso a 1m, al tubo se le ha dado un margen de seguridad de 20cm. El reglamento indica que hay que poner una arqueta cada 40m siempre que se pueda, pero en este caso no se pueden poner arquetas, por lo que en el tubo hay dos conductores de sobra, por si alguno falla, poder sustituirlo fácilmente.

## **6.4 – Línea interior**

Este tramo une la línea subterránea con el armario donde está la electrónica, su longitud es de 5m. Esta diseñado según las ITCs que regulan las instalaciones interiores. Los conductores están dentro de un tubo en montaje superficial. Según la normativa, la caída de tensión en este tramo debe ser inferior al 3%.

## **6.5 – cálculo de secciones**

Para el calculo de secciones se utilizan dos criterios, el criterio térmico y el de caída de tensión. Cada uno de los criterios indica una sección mínima, con la cual se cumple cada criterio, se escoge la mayor sección, que es la que cumplirá ambos criterios.

### **6.5.1 – Criterio térmico**

El criterio térmico sirve para ver si el cable se calienta a una temperatura mayor que su temperatura de funcionamiento, un calentamiento excesivo podría quemar el aislamiento, produciendo un cortocircuito, entre fases o entre fases y tierra.

El valor de las secciones mínimas se obtiene de las ITCs correspondientes. En el caso del aerogenerador, la corriente máxima que circulara por los cables es de 12,8A. Para este criterio, una sección de 1.5mm es suficiente.

### **6.5.2 – Criterio de caída de tensión**

El criterio de caída de tensión sirve para calcular la caída de tensión en la línea, para el valor de corriente máxima. En la línea todos los cables que se utilizan son de la misma sección, para el tramo interior la CDT máxima es del 3%, para el conjunto de toda la instalación se calculara la sección para una CDT máxima del 5%, en este caso, se cumplirá que la caída de tensión en la instalación interior será menor del 3%, ya que su longitud, proporcionalmente es muy pequeña. Para el calculo de sección se utiliza la siguiente fórmula:

$$S = \frac{L * P}{C * u * V}$$

Siendo:

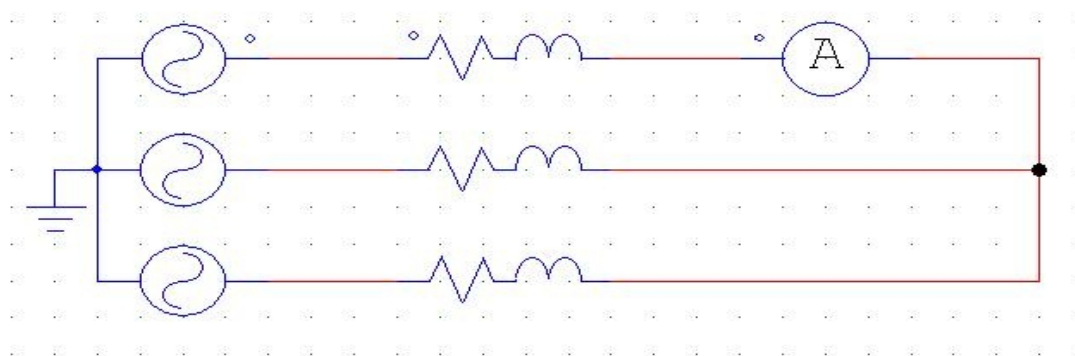
- L: longitud de la línea, 165m.
- P: Potencia, 4kW.
- C: Conductividad del cobre=56.
- u: Caída de tensión, 5% de 350V=17,5V.
- V: Tensión de línea 350V.

El valor mínimo para el cable es de 1,92mm, habrá que escoger una sección normalizada, la mas baja por encima de 1.92, que es 2,5mm.

### 6.5.3 – Criterio de cortocircuito

En el criterio de cortocircuito se calcula el valor que puede alcanzar un cortocircuito, y la duración de este, para asegurarse de que el cable pueda soportarlo sin sufrir daños. En una instalación convencional, cuando la corriente aumenta demasiado, un interruptor magnetotérmico corta la corriente. En el caso del aerogenerador no se puede hacer esto, debido a que el molino se quedaría en circuito abierto y se embalaría, con el consiguiente peligro de destrucción del molino. El cortocircuito se calcula con la tensión máxima del generador, que son 350V de tensión de línea y su impedancia característica.

Una vez cortocircuitado el molino, la velocidad de este disminuye hasta pararse, aunque si hay mucho viento, este no llega a pararse del todo. El valor de este cortocircuito se ha calculado con el programa de simulación Psim. En la siguiente imagen se puede apreciar como se ha calculado, el motor se ha simulado como una fuente de tensión trifásica, con su impedancia:



El valor del cortocircuito es de 93A, el valor de esta corriente disminuirá, porque al disminuir la velocidad, los valores de la tensión y la corriente disminuirán. La sección mínima que soporta esta corriente es de 16mm<sup>2</sup>.

## 6.6 – Cable empleado

El cable empleado es el de mayor sección de los criterios anteriores, 16mm<sup>2</sup>. Se colocaran cinco cables unipolares, con aislamiento de PVC. Su designación es la siguiente:

VVK 0,6/1kV 5xCu.

## **7º CAPÍTULO - ANEXOS**

## **7.1 - Conclusiones:**

Después de un año de trabajo, se ha finalizado este proyecto final de carrera. El principal objetivo de este proyecto era la construcción de un a aerogenerador para abastecer parte del consumo de una vivienda que se encuentra conectada a red. El objetivo principal se ha cumplido con éxito, ya que se ha construido el aerogenerador y ha estimado que es capaz de abastecer la vivienda al completo, siempre y cuando las baterías tengan la suficiente autonomía para que en las épocas de poco viento.

Se han aplicado los conocimientos adquiridos en muchas asignaturas, desde el primero hasta el último curso. También se ha aprendido a escoger cada componente y saber donde comprarlo.

Estas son las principales tareas que se han realizado en el transcurso del proyecto:

- Diseño de las palas aerodinámicas de 2m y su construcción de madera mediante C.M.C. Las palas se forraron con fibra de vidrio para darles resistencia y protegerlas contra la lluvia.
- Respecto al motor de imanes permanentes se puede destacar que se han cambiado la configuración del bobinado del motor para reducir la tensión de salida cuando funciona como generador.
- En cuanto a la estructura del aerogenerador se ha diseñado todas las partes ( góndola, veleta, contraveleta... ) necesarias para su construcción.
- Si nos centramos en la parte electrónica se ha construido un convertidor electrónico de forma que maximice el rendimiento del aerogenerador para cargar las baterías.
- El convertidor electrónico a sido diseñado y construido implementando el control con MPPT (Seguimiento del punto de máxima potencia) de manera analógica.

## **7.2 – Lineas futuras:**

A continuación se muestran distintas ideas para mejorar el proyecto en un futuro. Los objetivos principales serían reducir su coste y mejorar su rendimiento.

- En cuanto a la parte constructiva del aerogenerador se debería de diseñar unas palas empleando nuevos materiales que garanticen la durabilidad, la flexibilidad y un rendimiento bueno. Además de esto, sería importante saber su TSR exacto y el valor del rendimiento

para ese TSR.

- Un aerogenerador de este estilo debería de poseer un motor de poca tensión nominal y mucha corriente, ya que se ahorraría en el convertidor. El motor debería de pesar menos, para ahorrar en la estructura metálica que lo soporta.
- Se debería de investigar nuevas maneras orientación del viento y de protección contra los vientos muy fuertes, de este modo se podría simplificar el sistema de desorientación.
- En cuanto a la electrónica hay que destacar el convertidor, que podría ser digital. Esto simplificaría mucho los circuitos, podría ofrecer mejores protecciones y un mejor control. Si el modelo de las palas fuese exacto, en vez de una aproximación se podría mejorar el control con MPPT considerablemente, ya que se podría calcular mediante la exponencial correspondiente en vez de hacer una aproximación con tres rampas. Para hacer esto el modelo de todo el sistema tiene que ser mucho más preciso y se podría saber el valor de la velocidad a partir de la frecuencia, que es mucho más exacto que el cálculo a partir de la tensión rectificada.

## **7.3 – Presupuesto:**

La construcción del aerogenerador ha tenido unos gastos considerables, a continuación se presenta una hoja de cálculo con los gastos que supondría hacer un aerogenerador igual que este. Se han omitido los gastos de componentes que se han averiado o al final no se han llegado a utilizar.



## Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga

Material	cantidad	Precio unitario (I.V.A incluido)€	Importe total €
<b>PARTE MECANICA</b>			
Motor de aerogenerador	1	1000	1000
Palas aerodinamicas	3	270	810
Fibra de vidrio	1	240	240
Chapas del aerogenerador	1	150	150
Pintura	1	80	80
Poste electrico	1	500	500
		<b>TOTAL MECANICA:</b>	<b>2780</b>
<b>PARTE ELECTRICA</b>			
Tubo corrugado	3	30	90
Cable de 6mm²	3	160	480
		<b>TOTAL ELECTRICA:</b>	<b>570</b>
<b>PARTE ELECTRONICA</b>			
Inductancia	1	250	250
Rectificador trifasico	1	54,48	54,48
Modulo de IGBT Chopper	1	98,24	98,24
Condensador 270uF	10	0,199	1,99
Condensador de desacoplo	1	11,48	11,48
Sensor de corriente	1	42	42
Sensor de tensión	1	88,98	88,98
Rele multifunción	2	44,9	89,8
Rele trifasico	2	25,3	50,6
Fusible	1	3	3
Portafusible	1	24	24
Ventiladores	2	5,03	10,06
Traco Power	2	22,32	44,64
Amplificadores operacionales	20	0,53	10,6
Conectores	20	4,5	90
Funda termoretractil	10	0,8	8
Resistencias	3	30	90
Driver	1	120	120
Led (rojos y verdes)	8	0,183	1,464
Armario	1	99,62	99,62
		<b>TOTAL ELECTRONICA:</b>	<b>1188,954</b>
<b>ALMACENAMIENTO DE ENERGIA</b>			
Baterías	16	12	192
		<b>TOTAL ALMACENAMIENTO DE ENERGIA:</b>	<b>192</b>
		<b>PRECIO TOTAL DEL AEROGENERADOR:</b>	<b>4730,954</b>

La construcción del aerogenerador a costado **4730,954€**. Esta cifra es el valor total de la construcción del aerogenerador sin contar con la mano de obra.

En cuanto al material electrónico hay que destacar que la mayoría de los componentes electrónicos se han cogido del laboratorio de energías renovables de la UPNA, como las resistencias, potenciómetros, condensadores, diodos, cables... Las placas de PCB también se han hecho en la UPNA. De esta manera se ha ahorrado bastante dinero, ya que cada placa cuesta alrededor de 200€

## 7.4 – Bibliografía:

A continuación se muestra la bibliografía, los distintos programas y apuntes de asignaturas que han servido de ayuda para este proyecto.

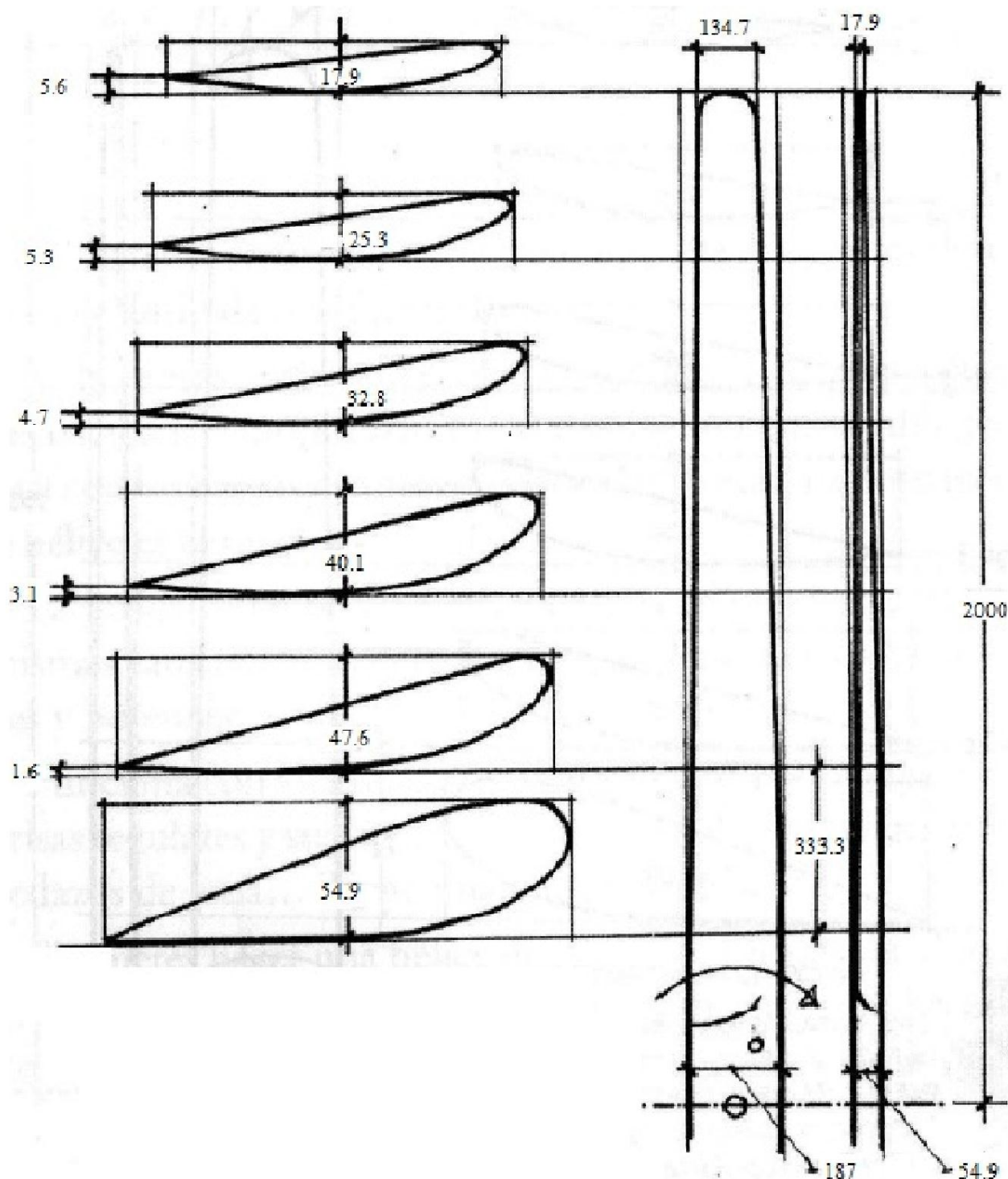
### *Construcción de un aerogenerador y un convertidor de carga*

- Libro de “Energía Renovable práctica”, editorial PAMIELA edición 2003, Iñaki y Sebastian Urkia.
- PFC de Miguel Ángel Chica Sanchez: *Puente en H con control de corriente para una maquina de corriente continua.*
- PFC de Ivan Tambo Cuenca y Enrique Faci Cantero: *Estudio y construcción de un aerogenerador de imanes permanentes.*
- Apuntes de las siguientes asignaturas:
  - “*Accionamiento Eléctricos*”
  - “Electrónica de potencia”
  - “Maquinas eléctricas I”
  - “Maquinas eléctricas II”
  - “Circuitos”
  - “Diseño eléctrico asistido por ordenador”
  - “Electrónica industrial”
  - “Regulación automática”
  - “Teoría de mecanismos y estructuras”
  - “Instalaciones eléctricas”
  - “Instrumentación”
  - “Conversión de energía en sistemas eólicos” del máster de enerfías renovables
- Programas informáticos

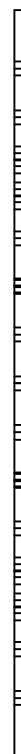
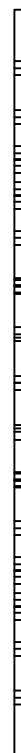
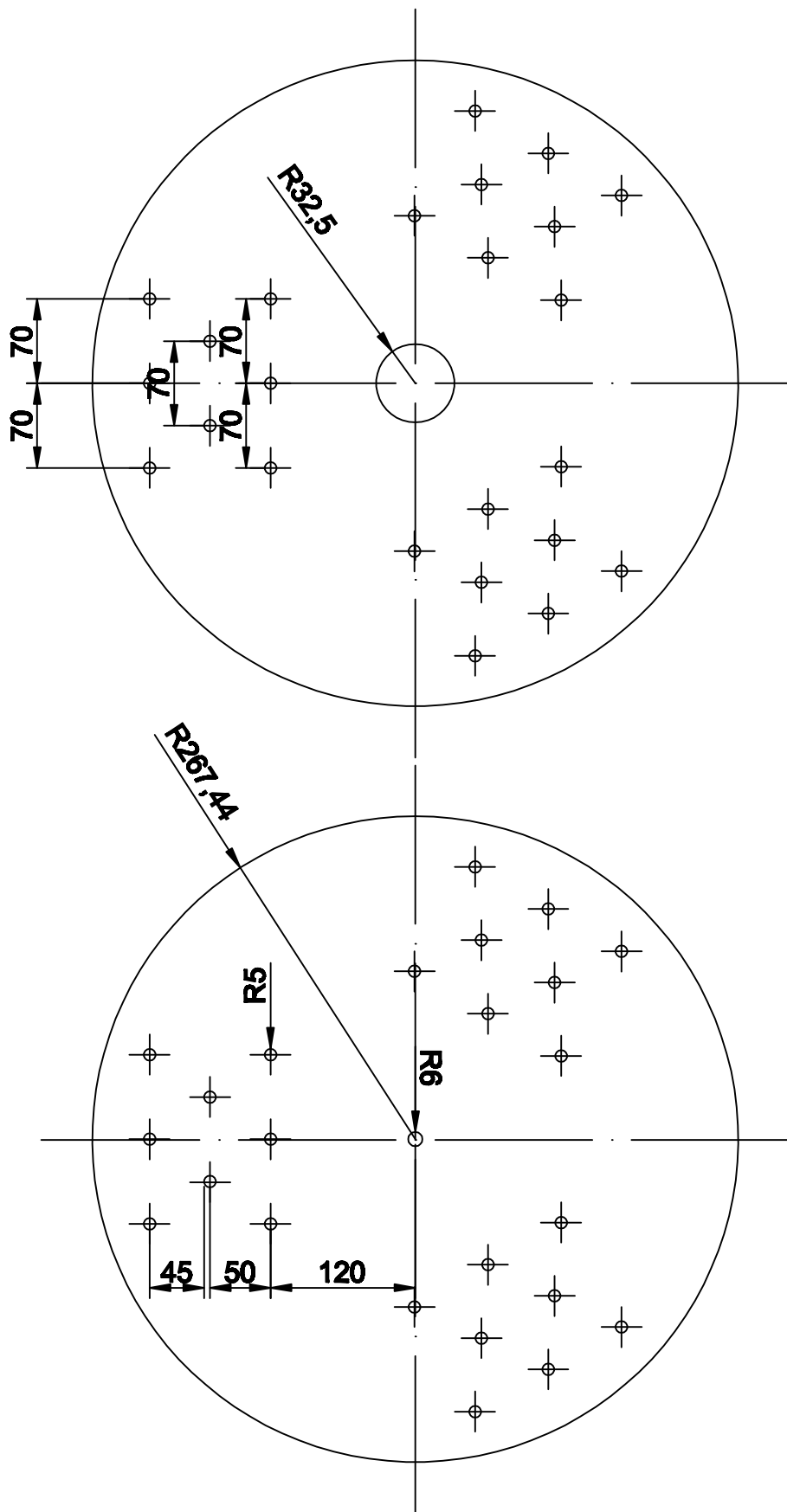
- PSIM, para simular circuitos.
- OPEN OFFICE: Se ha utilizado para realizar hojas de cálculo con distintos datos y para la redacción del proyecto
- DESIGN SPARK: Este programa se ha utilizado para diseñar las placas PCB
- AUTOCAD Y CATIA: Estos programas se han utilizado tanto para el diseño de las palas como la confección de planos.

## **7.5 – Planos**

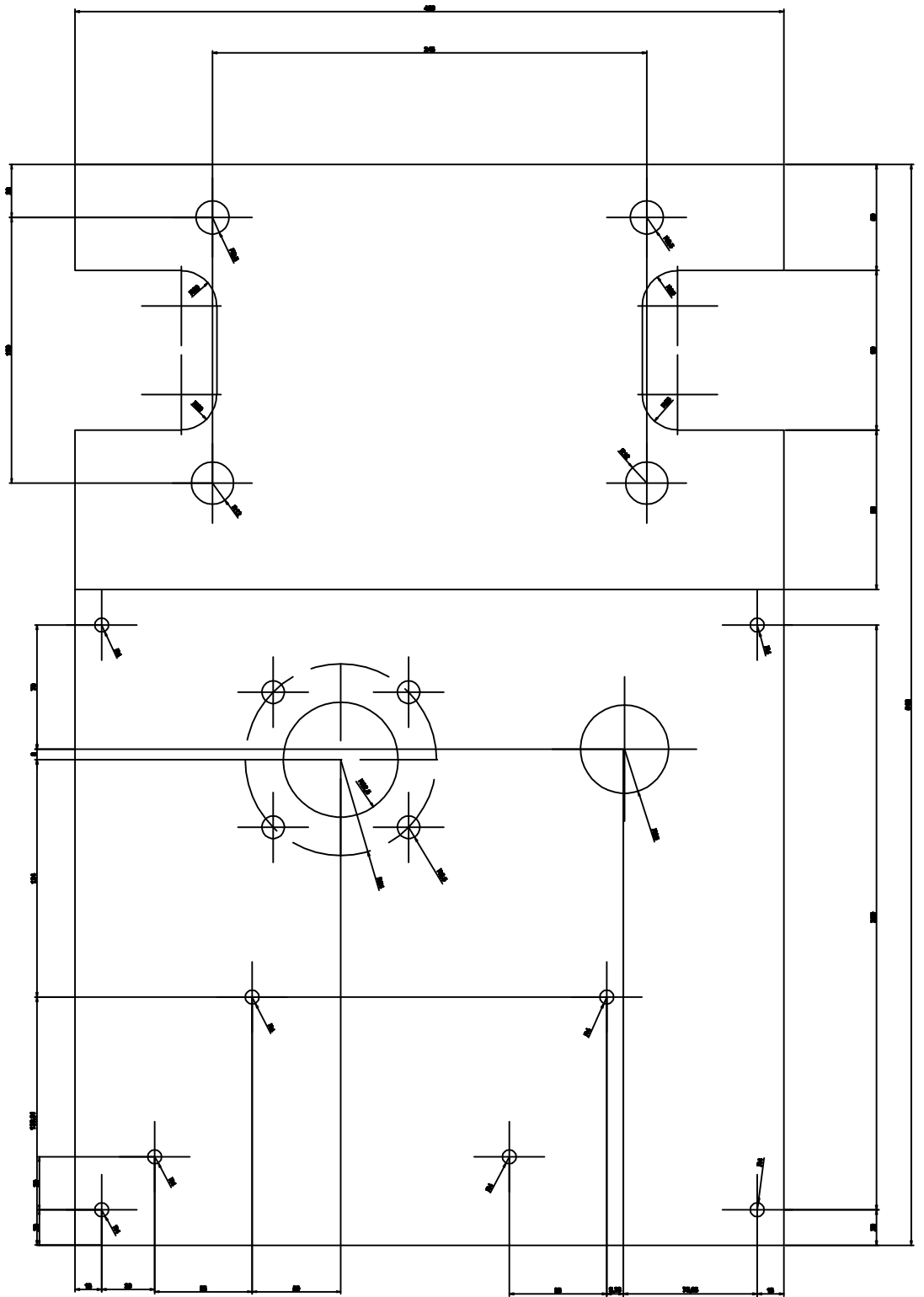
A continuación se muestran los planos de los distintos componentes del aerogenerador.



Cotas	Título	Nº Plano
mm	Palas	01

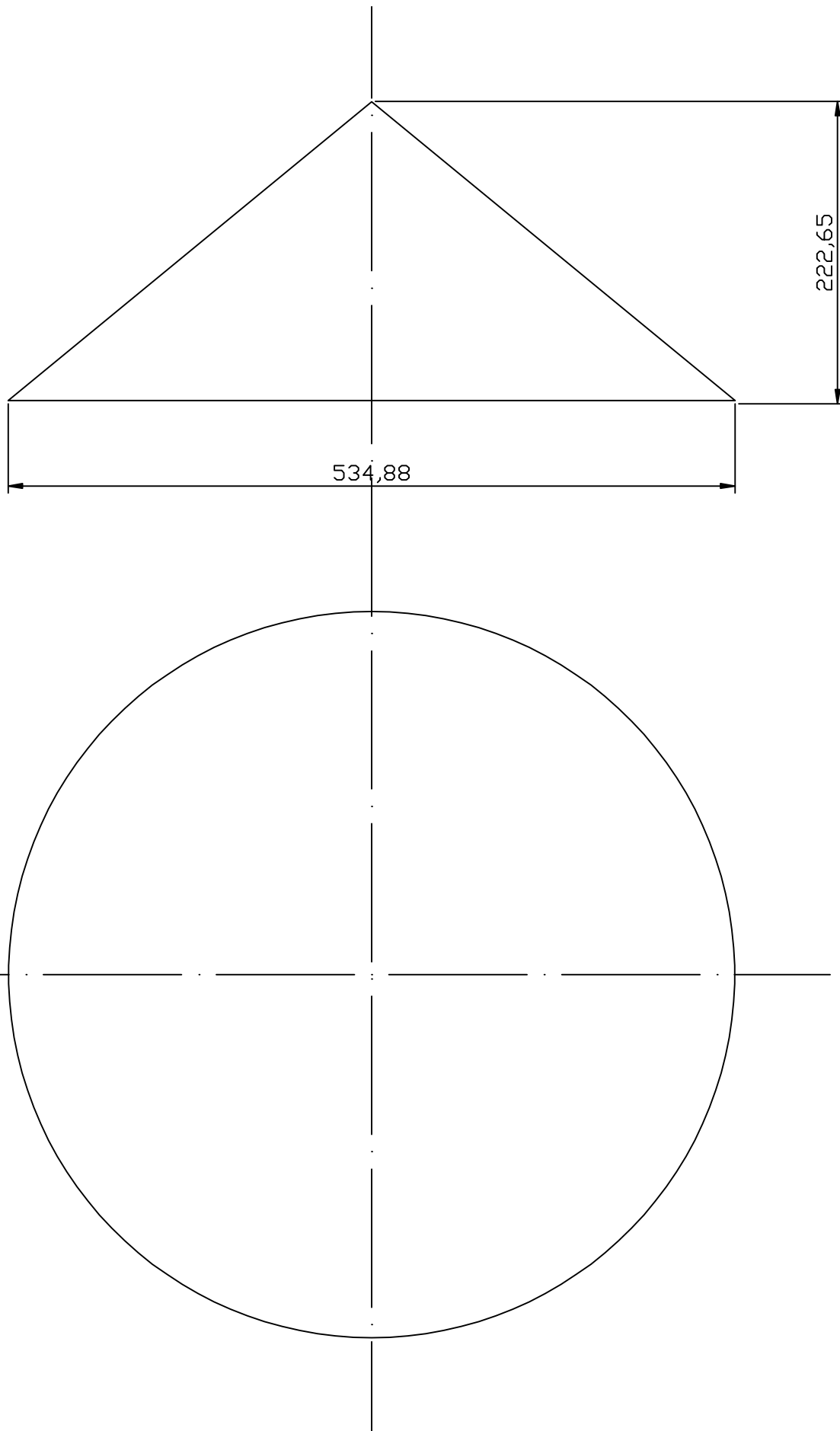


Cotas	Título	Nº de plano
mm	Enganche palas	02

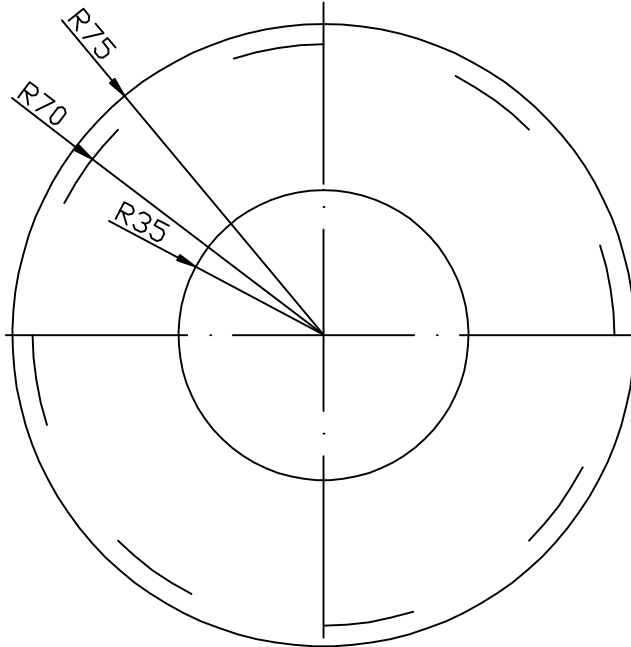
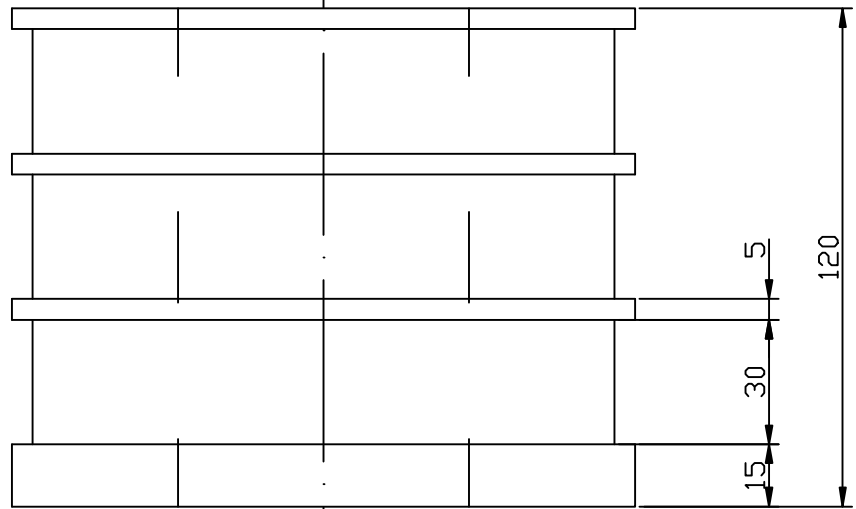


Cotas	Título	Nº Plano
mm	Chasis	03

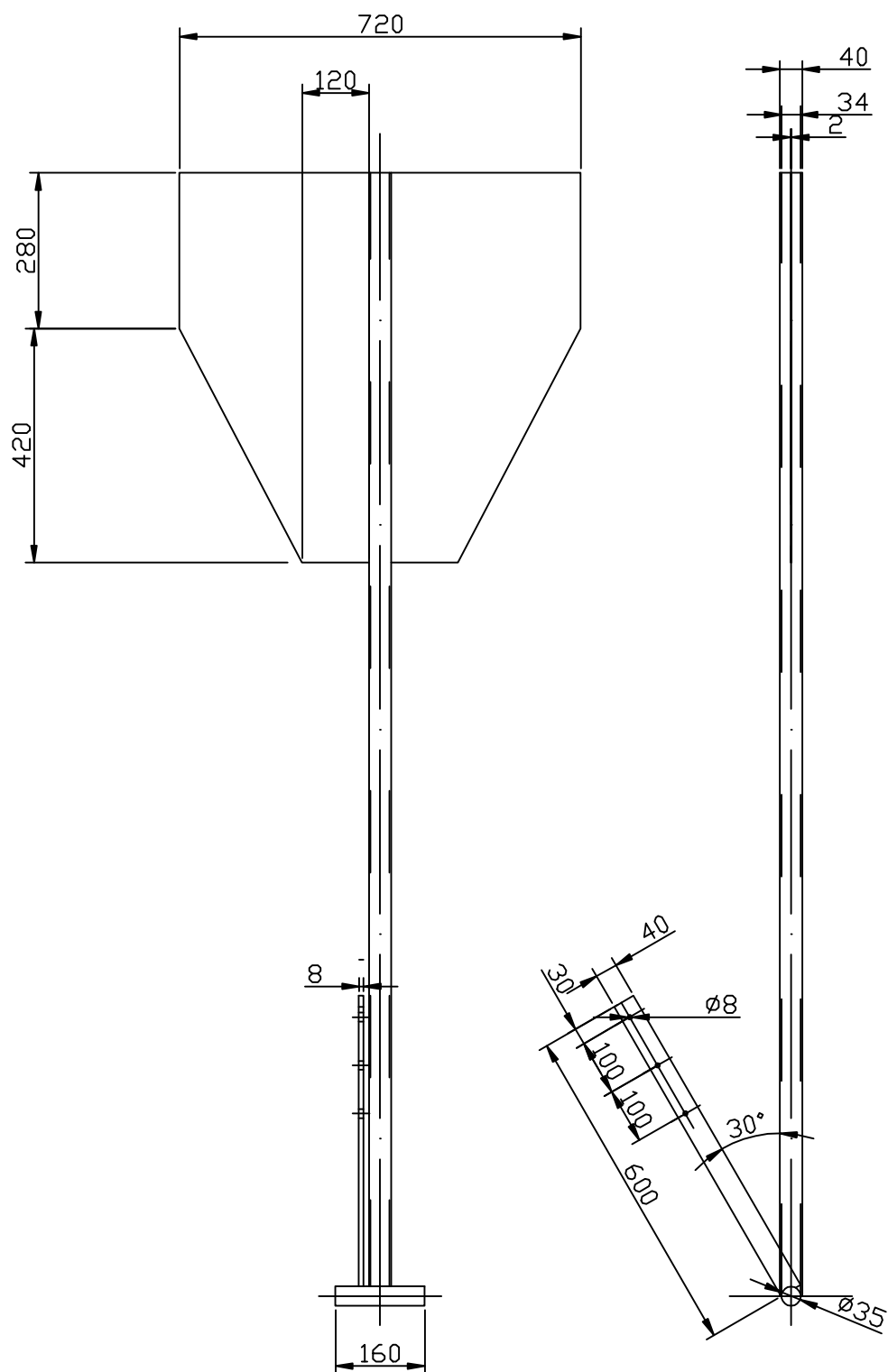




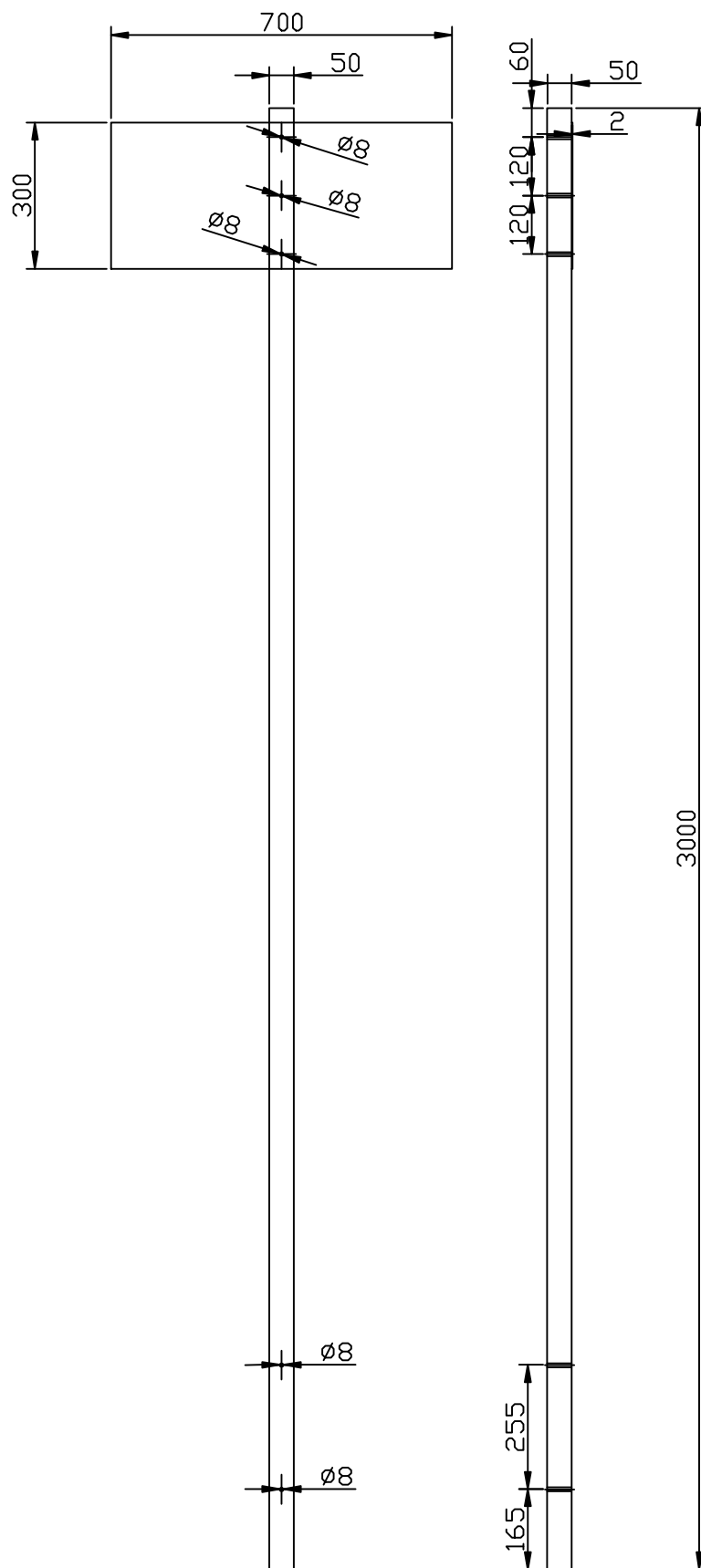
Cotas	Título	Nº Plano
mm	Cono	04



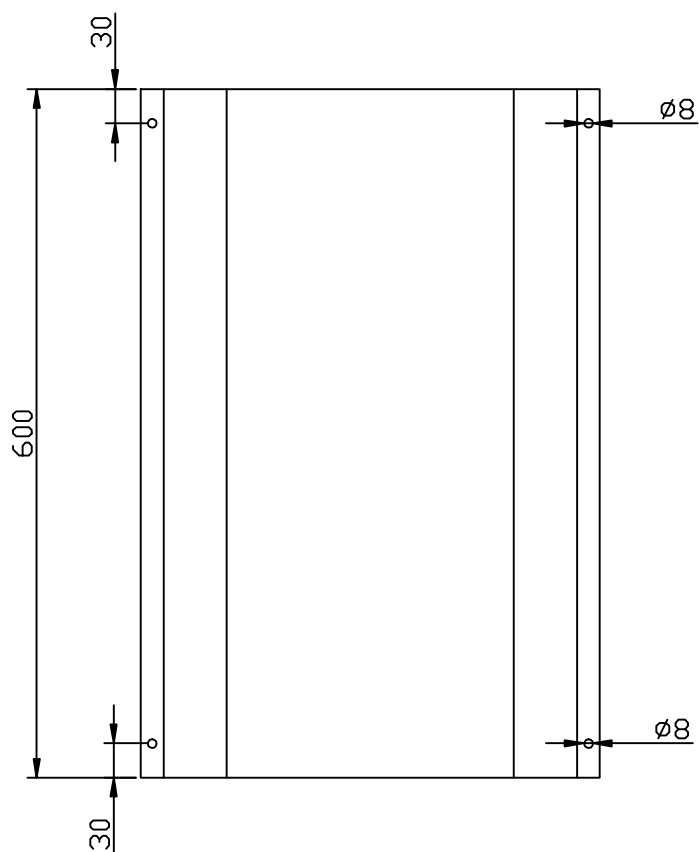
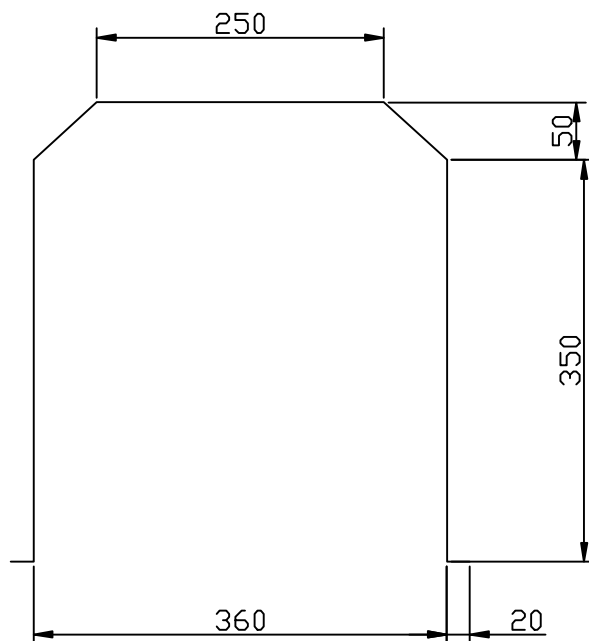
Cotas	Título	Nº Plano
mm	Escobillas	05



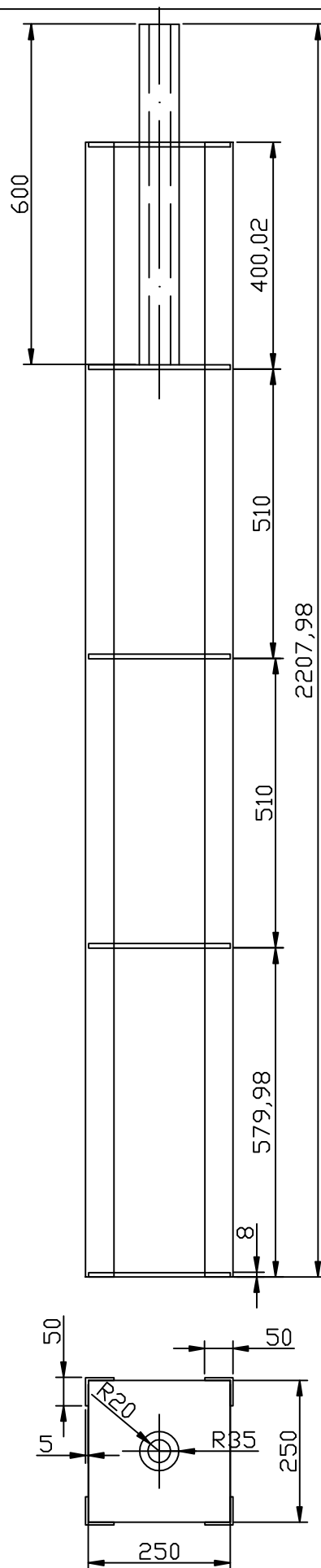
Cotas	Título	Nº Plano
mm	Veleta	06



Cotas	Título	Nº Plano
mm	Contraveleta	07

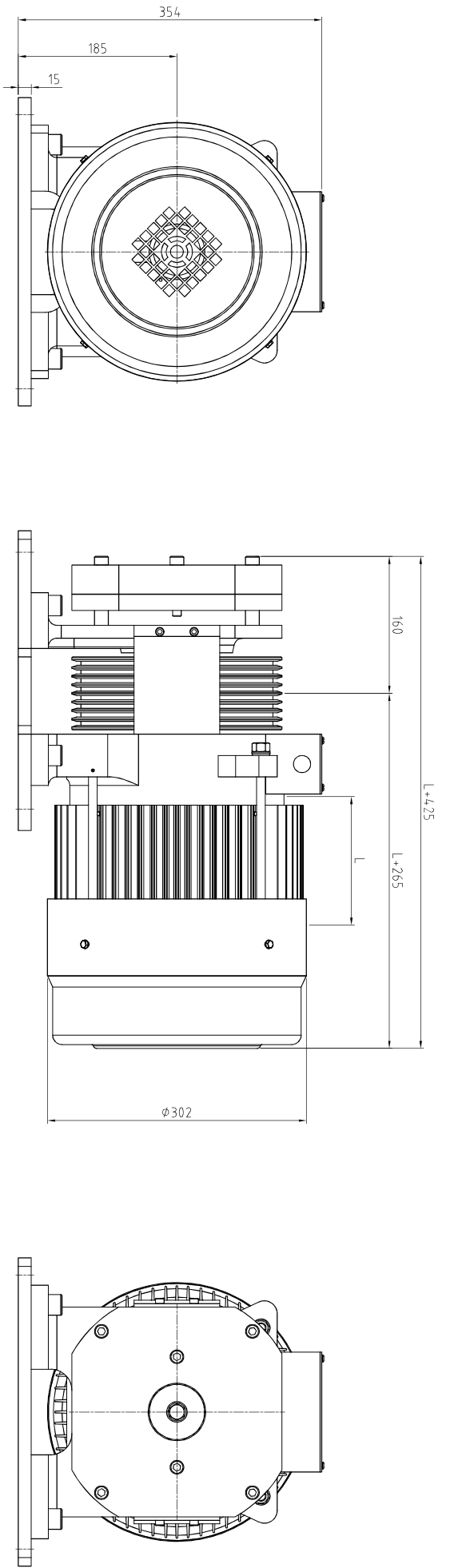


Cotas	Título	Nº Plano
mm	Cubierta	08



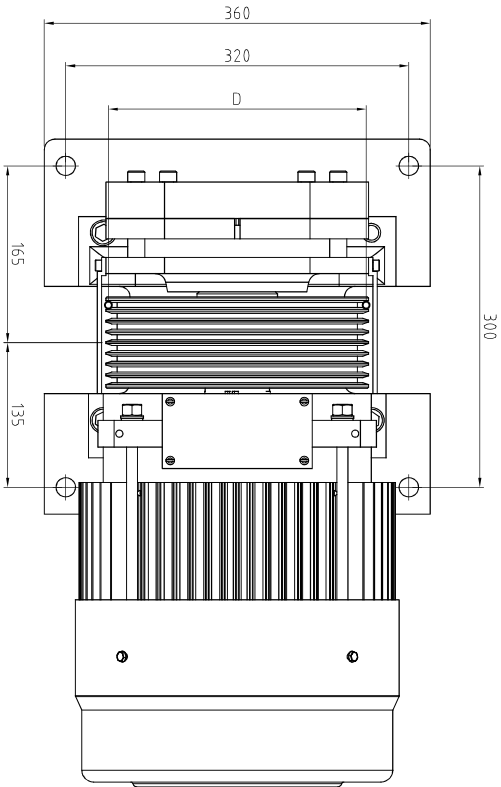
Cotas	Título	Nº Plano
mm	Torre	09

Dimensiones para L=75mm/115mm/150mm  
Dimensions for L=75mm/115mm/150mm



Ge-aaa-bbb-ccc  
L D W

Example:  
ge-150-240-225  
L=150mm  
D=240mm



Nº PIEZAS	DENOMINACIÓN COTAS										Nº PZA	DEUO	Nº	MATERIAL	MODELO	PESO			
	FECHA		NOMBRE		TOLERANCIAS GENERALES														
	Dibujado		DISEÑO		±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5			
	Comprobado		TOLERANCIAS		±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±1,2	±1,2	±1,2	±1,2	±1,2	±1,2			
	Aprobado		MODIFICACIONES		Cotas sin tolerancias según norma ISO 2768-mS														
					</														